



**KESİT ORANI OPTİMİZE EDİLMİŞ BOŞLUKLU  
ÇELİK KİRİŞLERİN YÜK KAPASİTESİNİN  
İNCELENMESİ  
Nurullah ÇINAR**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Mahyar MAALI**

**2023  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KESİT ORANI OPTİMİZE EDİLMİŞ BOŞLUKLU ÇELİK KİRİŞLERİN**  
**YÜK KAPASİTESİNİN İNCELENMESİ**

**Nurullah ÇINAR**

**Doç. Dr. Mahyar MAALI**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Erzurum**

**2023**

**Her hakkı saklıdır**

## **ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

03 / 05 / 2023

Nurullah ÇINAR

## ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

### KESİT ORANI OPTİMİZE EDİLMİŞ BOŞLUKLU ÇELİK KİRİŞLERİN YÜK KAPASİTESİNİN İNCELENMESİ

Nurullah ÇINAR

Erzurum Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mahyar MAALI

Artan insan nüfusu beraberinde, kullanılan yapı sayısını artırmıştır. Yapı sayısındaki bu artış maliyetide etkilemiştir. Bu etki yapıların güvenli, ekonomik ve estetik bina tasarlanması için yapı elemanlarında çeşitli tasarımlar yapılmaya yönlendirmiştir. Petek kirişler bu bağlamda yapılan tasarımlardandır. Açılan delikler sayesinde aynı eş değer ölçülere sahip kirişlerle aynı yükü taşıması ve maliyetin düşürülmesini sağlamıştır. Kullanıldığı yere görede estetik bir görünüm sağlamıştır. Yapılan kaynak taramalarında döngüsel yükler altında petek kirişlerin tasarımı yeteri kadar irdelenmediği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada döngüsel yük altında petek kirişlerin üzerlerinde açılan deliklerin geometrik sınır şartlarına göre davranışlarının belirlenmesi için 5 adet numune üzerinde deneyler ve ABAQUS program aracılığıyla sayısal analizler yapılarak kıyaslanmıştır. Deneylerde FEMA-350 yükleme protokolü kullanılarak döngüsel yük uygulanmıştır. Kiriş yüksekliğinin delik çapına oranı sınır şartlara uygunluk sağlayan altın orana eşitlenerek petek kiriş tasarımına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak altın orana göre tasarlanmış deliklerin çaplarına sahip petek kirişlerin daha küçük delik çapına sahip petek kirişlere göre daha fazla yük taşıdığı sonucuna varılmıştır.

**2023, 86 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Petek Kiriş, Altın Oran, Döngüsel Yük, Abaqus, Deneysel

## **ABSTRACT**

MS. Thesis

### **INVESTIGATION OF THE LOAD CAPACITY OF STEEL BEAMS WITH OPTIMIZED SECTION RATIO**

Nurullah ÇINAR

Erzurum Technical University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahyar MAALI

The increasing human population has increased the number of buildings used. This increase in the number of buildings has also affected the cost. This effect has led to the making of various designs in the structural elements of the buildings to design safe, economical, and aesthetic buildings. Castellated beams are designs made in this context. Thanks to the opened holes, they carry the same load as the beams with the equivalent dimensions. Thus reducing the cost part. However, the literature surveys concluded that the design of castellated beams under cyclic loads needed to be adequately examined. This study performed experiments on five samples and analyses on the ABAQUS program to determine the behavior of holes drilled on honeycomb beams for cyclic load with relevant geometric boundary conditions. The cyclic load was applied in the experiments using the FEMA-350 loading protocol. The ratio of the beam height to the hole diameter is equalized to the golden ratio, which is compatible with the boundary conditions, and its effect on the castellated beam design is examined. As a result, it was concluded that castellated beams with hole diameters designed according to the golden ratio carry more load than castellated beams with smaller hole diameters.

**2023, 86 page**

**Keywords:** Castellated beams, Golden Ratio, Circular Load, Abaqus, Experimental

## TEŞEKKÜR

Deney ve test çalıŐmalarım sırasında değerli bilgi birikimini ve tecrübelerini benden esirgemeyen bana maddi ve manevi destek olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mahyar MAALI'ye ve tezimin deney aşamasında tecrübelerini benimle paylaŐan Sayın Doç. Dr. Merve MAALI 'ye, deneylerde ve test çalıŐmalarım sırasında bana yardımcı olan ArŐ. Gör. Mahmut Buęra BİLEN'e, gerek ortaöğretim, lisans gerek yüksek lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi hiçbir yardımı benden esirgemeyen babama ve anneme teşekkür ederim.

**Nurullah ÇINAR**  
**Mayıs 2023**

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Tezin Amacı.....	1
1.2. Petek Kiriş.....	2
1.2.1. Boşluklu kirişlerin tercih edilmesi .....	3
1.2.2. Petek kirişlerin imalat türleri.....	5
1.2.3. Gövdesi boşluklu kiriş türleri.....	6
1.2.4. Petek kirişlerde göçme modları.....	7
1.2.5. Petek kirişlerin geometrik tasarım prosedürü .....	11
1.2.6. Kullanım alanları.....	12
1.3. Altın Oran.....	13
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	20
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	25
3.1. Deneysel Çalışmalar ve Numuneler.....	25
3.1.1. Kirişlerde dairesel boşlukların oluşturulması.....	26
3.1.2. Numunelerin geometrik sınır şartları için uygunluk kontrolü.....	26
3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler .....	30
3.2.1. Hidrolik dinamik aktüatör .....	30
3.2.2. Deformasyon ölçme cihazı.....	31
3.2.3. Veri toplama ve kaydetme sistemi (Data logger) .....	33
3.3. Deney Düzenegi .....	34
3.4. Döngüsel Yükleme ve Yükleme Protokolleri .....	36
3.4.1. ATC-24 yükleme protokolü.....	36
3.4.2. FEMA-350 yükleme protokolü .....	37

3.4.3. FEMA-461 yükleme protokolü.....	38
3.4.4. Rastgele yükleme protokolü.....	39
<b>4. DENEY VE SONLU ELEMANLAR SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>40</b>
4.1. Deneylerin Karşılaştırılması .....	40
4.1.1. Deformasyon değerleri.....	49
4.2. Sonlu Eleman Sayısal Model Yöntemi .....	53
4.2.1. Sonlu elemanlar modeli.....	53
4.2.2 Sınır koşullari ve yük yükleme .....	55
4.2.3. Malzeme özellikleri ve numune modeli kalibrasyonu .....	57
4.2.4. Sonlu eleman modellerinin sonuçlarının karşılaştırılması .....	57
4.2.5. Deneysel ve FEM verilerinin kıyaslanması .....	67
<b>4.2.6. Deneysel ve Fem Analizlerinin Resimlerle Analizi .....</b>	<b>69</b>
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>83</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>84</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
cm	Santimetre
kN.m	Kilonewtonmetre
m	Metre
mm	Milimetre
P	Basınç
rad	Radyan
$\Delta$	Yer Değişirme
$\sigma_m$	Kirişin emniyetli gerilmesi
$\Theta$	Dönme
$\theta_{Mjmax}$	Eğilme Momentine Karşılık Gelen Dönme
$\theta_p$	Plastik Momente Karşılık Gelen Dönme
$\phi$	Altın Oran

### Kısaltmalar

a	Kirişin başlıklarının ağırlık merkezleri arasındaki mesafe
AISI	American Iron and Steel Institute Specification
ASTM	American Society for Testing Materials
f	Kirişin Başlığının Alanı
FE	Sonlu Elemanlar
FEMA	Federal Emergency Management Agency
Fmax	Maksimum Kuvvet
H <sub>s</sub>	Kiriş Yüksekliği
JIFS	Japonya Demir Çelik Federasyonu
L	Kiriş Boyu
LDB	Lateral distortional buckling
LFB	Local flange buckling
LTB	Lateral torsional buckling
LVDT	Deformasyon Ölçme Cihazı

M	Moment
$M_{jRd}$	Eğilme Momenti
$M_p$	Plastik Moment
M- $\theta$	Moment-Dönme
$M_{\theta Cd}$	Eğilme Momenti Kapasitesi
S	Delikler Arasındaki Mesafe
VIER	Vierendeel mekanizması
WBC	Web buckling due to compression
WPB	Web post-buckling due to shear



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kesim ve birleşim şekilleri (Kaygısız 2019) .....	3
Şekil 1.2. Profil kesitindeki gerilme dağılımı (Kalaycıgil 2007).....	4
Şekil 1.3. I Profil ve petek kirişler arasındaki mukavemet momenti artışı (Kalaycıgil 2007) $\text{cm}^3$ .....	5
Şekil 1.4. Dairesel boşluklu kiriş kesiti .....	6
Şekil 1.5. Angelina boşluklu petek kiriş kesit.....	6
Şekil 1.6. Hexagonal delikli petek kiriş (Altıgen formu) .....	7
Şekil 1.7. Gövde kaynak bölgesinde meydana gelen yırtılmalar.....	9
Şekil 1.8. Kaynak bağlantısının yırtılması (Kaygısız 2019).....	10
Şekil 1.9. Dairesel kirişte yüksek kesme (Kaygısız 2019).....	10
Şekil 1.10. Boşluklu kirişin geometrik parametreleri (Erdal 2013).....	12
Şekil 1.11. Hal kafes kirişleri (Kalaycıgil 2007).....	13
Şekil 1.12. Altın dikdörtgen kökenli logaritmik sarmal (Akdeniz 2007) .....	14
Şekil 1.13. Leonardo Da Vinci Vitruvius adamı (Akademi müzesi) .....	15
Şekil 1.14. Mona Lisa tablosu ve altın spiral (Akdeniz 2021) .....	15
Şekil 1.15. Altın dikdörtgen ve altın spiralin (Selçuk 2009) .....	16
Şekil 1.16. Ayçiçeği fibonacci sayıları analizi (Dunlap 2003) .....	16
Şekil 1.17. Midye kabukları (Selçuk 2009) .....	17
Şekil 1.18. İnsan parmağının altın oran gösterimi (Tekkanat 2006).....	17
Şekil 1.19. Parthenon cephesi altın oran uyum çalışması (Ghyka 1977).....	18
Şekil 1.20. Altın oran kumpası yardımıyla doğada görülen altın oran örnekleri (Selçuk 2009). .....	18
Şekil 1.21. Keops piramidi (Selçuk 2009).....	19
Şekil 3.1. Dairesel boşluklu kirişlerin imalatında.....	26
Şekil 3.2. EXP5-D192 numunesinin geometrik şekli .....	27
Şekil 3.3. EXP4-D160 numunesinin geometrik şekli .....	27
Şekil 3.4. EXP3-D148 numunesinin geometrik şekli .....	28
Şekil 3.5. EXP-D137 numunesinin geometrik şekli .....	29
Şekil 3.6. Deneyde kullanılan petek kirişlerin detayları .....	29
Şekil 3.7. Deneyde kullanılan numunelere ait modeller .....	30
Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan hidrolik dinamik aktüatörün şekli .....	31

<b>Şekil 3.9.</b> Deneylerde kullanılan LVDT'ler .....	32
<b>Şekil 3.10.</b> Deneyde kullanılan yaprak tipi gerinim ölçer (Published 2017).....	33
<b>Şekil 3.11.</b> Deneylerimizin yapım aşamasında kullanılan data logger .....	34
<b>Şekil 3.12.</b> Deneylerin yapıldığı sistem ve numune yerleşim modeli (a) önden görünüşü; (b) sağ önden görünüşü; (c) sol önden görünüşü. ....	35
<b>Şekil 3.13.</b> Atc-24 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022).....	37
<b>Şekil 3.14.</b> FEMA-350 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022) .....	38
<b>Şekil 3.15.</b> FEMA-461 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022) .....	39
<b>Şekil 3.16.</b> Rastgele yükleme protokolü (Okazaki ve Engelhart 2007).....	39
<b>Şekil 4.1.</b> EXP-PERFECT numunesinin moment-dönme grafiğidir .....	41
<b>Şekil 4.2.</b> EXP2-D137 numunesinin moment-dönme grafiğidir.....	41
<b>Şekil 4.3.</b> EXP2-D148 numunesinin ( $H_s/D_0=1,618$ (altın orana) göre tasarlanan numune) moment-dönme grafiğidir.....	42
<b>Şekil 4.4.</b> EXP4-D160 numunesinin moment-dönme grafiğidir .....	42
<b>Şekil 4.5.</b> EXP5-D192 numunesinin Moment-Dönme grafiğidir .....	43
<b>Şekil 4.6.</b> Kontrol numunesine göre maksimum moment ( $M_{max}$ ) değişimi (%).....	44
<b>Şekil 4.7.</b> Kontrol numunesine göre $F_{max}$ değişimi (%).....	45
<b>Şekil 4.8.</b> Kontrol numunesine göre $\Delta F_{max}$ değişimi (%) .....	46
<b>Şekil 4.9.</b> Kontrol numunesine göre $\Theta F_{max}$ değişimi (%) .....	47
<b>Şekil 4.10.</b> Kontrol numunesine göre enerji yutma kapasitesi değişimi (%).....	48
<b>Şekil 4.11.</b> EXP2-D137 Şekil değişimi-Yük grafiği (EXP2-D137 numunesinin kaynağında bulunan St1 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği ve gövde de bulunan St2 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği şekil değişimi.).....	49
<b>Şekil 4.12.</b> EXP3-D148 Şekil değişimi-Yük grafiği (EXP3-D148 $H_s/D_0=1,618$ (altın orana) göre tasarlanan numunenin kaynağında bulunan St1 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği ve gövde de bulunan St2 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği şekil değişimi.) .....	50
<b>Şekil 4.13.</b> EXP4-D160 Şekil değişimi-Yük grafiği (EXP4-D160 numunesinin kaynağında bulunan St1 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği ve gövde de bulunan St2 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği şekil değişimi.).....	51
<b>Şekil 4.14.</b> EXP5-D192 Şekil değişimi-Yük grafiği (EXP5-D192 numunesinin kaynağında bulunan St1 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği ve gövde de bulunan St2 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği şekil değişimi.).....	51
<b>Şekil 4.15.</b> Dijitalleştirilmiş deney modeli .....	54

Şekil 4.16. FEM elemanların ağ halleri .....	55
Şekil 4.17. FEM modelinde kullanılan yükler .....	56
Şekil 4.18. Deneyde kullanılan yükleme protokolü.....	56
Şekil 4.19. S235 çeliğinin deneyden önce yapılan çekme testi sonucu .....	57
Şekil 4.20. FEM-EXP-PERFECT numunesinin moment-dönme grafiğidir.....	58
Şekil 4.21. FEM-EXP2-D137 numunesinin moment-dönme grafiğidir.....	58
Şekil 4.22. FEM-EXP3-D148 numunesine ( $H_s/D_0=1,618$ (altın orana) göre tasarlanan numune) moment-dönme grafiğidir. ....	59
Şekil 4.23. FEM-EXP4-D160 numunesinin moment-dönme grafiğidir.....	59
Şekil 4.24. FEM-EXP5-D192 numunesinin moment-dönme grafiğidir.....	60
Şekil 4.25. FEM-EXP-PERFECT numunesinin yük-deplasman grafiğidir.....	60
Şekil 4.26. FEM-EXP2-D137 numunesinin yük-deplasman grafiğidir.....	61
Şekil 4.27. FEM-EXP3-D148 numunesine ( $H_s/D_0=1,618$ (altın orana) göre tasarlanan numune) yük-deplasman grafiğidir. ....	61
Şekil 4.28. FEM-EXP4-D160 numunesinin yük-deplasman grafiğidir.....	62
Şekil 4.29. FEM-EXP5-D192 numunesinin yük-deplasman grafiğidir.....	62
Şekil 4.30. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre maksimum moment ( $M_{max}$ ) değişimi (%). ....	63
Şekil 4.31. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre $F_{max}$ değişimi (%) .....	64
Şekil 4.32. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre $\Delta F_{max}$ değişimi (%).....	65
Şekil 4.33. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre $\Theta F_{max}$ değişimi (%) .....	66
Şekil 4.34. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre enerji yutma kapasitesi değişimi (%). ....	67
Şekil 4.35. Plastik mafsal oluşumu işaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP- PERFECT) .....	69
Şekil 4.36. Alın levhasında kirişin temas ettiği bölgelerde şekil değişimi oluşmuştur (EXP-PERFECT). ....	70
Şekil 4.37. Delik çapı $D=137$ mm olan kirişde hiçbir göçme modu oluşmamıştır (EXP2-D137). ....	71
Şekil 4.38. Plastik mafsal oluşumu işaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP2- D137).....	72
Şekil 4.39. Alın levhasında krişin temas ettiği bölgelerde şekil değişimi oluşmuştur (EXP2-D137). ....	72

<b>Şekil 4.40.</b> Delik çapı $D=148$ mm olan kirişde hiçbir göçme modu oluşmamıştır (EXP3-D148). .....	73
<b>Şekil 4.41.</b> Plastik mafsal oluşumu işaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP3-D148)...	74
<b>Şekil 4.42.</b> Alın levhasında kirişin temas ettiği bölgelerde işaretlerin gösterdiği yönde şekil değişimi oluşmuştur (EXP3-D148).....	75
<b>Şekil 4.43.</b> Delik çapı $D=160$ mm olan kirişde hiçbir göçme modu oluşmamıştır (EXP4-D160). .....	76
<b>Şekil 4.44.</b> Plastik mafsal oluşumu işaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP4-D160)...	77
<b>Şekil 4.45.</b> Alın levhasında kirişin temas ettiği bölgelerde şekil değişimi oluşmuştur (EXP4-D160).....	78
<b>Şekil 4.46.</b> Vierendeel mekanizması görülmüştür (EXP5-D192) .....	79
<b>Şekil 4.47.</b> Plastik mafsal oluşmamıştır. İşaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP5-D192).....	81

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Numunelerin boyutları.....	25
Çizelge 3.2. Deneilerin yapıldığı sistemin elemanları .....	36
Çizelge 3.3. ATC-24 yükleme protokolü değerleri .....	37
Çizelge 4.1. Kontrol numunesine göre Mmax değişimi (%) ve Fmax değişimi (%).....	44
Çizelge 4.2. Kontrol numunesine göre $\Delta F_{max}$ değişimi (%) $\Theta F_{max}$ değişimi (%) .....	46
Çizelge 4.3. Kontrol numunesine göre enerji yutma kapasitesi değişimi (%).....	47
Çizelge 4.4. Deformasyon değerleri .....	52
Çizelge 4.5. Deneyde kullanılan bütün elemanların özellikleri.....	57
Çizelge 4.6. Kontrol numunesine göre modellenen numunelerin Mmax Değişimi (%) ve Mmax değişimi (%).....	63
Çizelge 4.7. Kontrol numunesine göre, modellenen numunelerin $\Delta F_{max}$ değişimi (%) ve $\Theta F_{max}$ değişimi (%).....	65
Çizelge 4.8. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre enerji yutma kapasitesi değişimi (%). .....	66
Çizelge 4.9. Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen değerlerin, deneyler sonucu elde edilen değerlere göre değişimi (%)......	67

### 1. GİRİŞ

Artmakta olan insan nüfusu barınma ve yaşam alanı ihtiyaçlarını beraberinde getirmektedir. Bu temel ihtiyaçların gelişen inşaat teknolojileriyle giderilmesi gerekmektedir. Bunun için de yapılarda yenilikçi tasarımlara gereksinim duyulmaktadır. Bu tasarımları yaparken güvenli, ekonomik ve estetik kriterler göz önüne alınarak yapılmalıdır. Gelişen inşaat sektöründe bu kriterlerin yer alması gerekmekte ve bunun için yapılarda ve yapı elemanlarında birçok tasarım yapılmaktadır. Bu tasarımları yaparken en önemlisi maliyeti daha az yapılar tasarlamak ve bu tasarımları ülke ekonomimize, doğal kaynaklarımıza olumlu yöndeki etkisinden düşünerek yapmalıyız. Güvenli, ekonomik ve estetik ilkelerimizi göz önünde bulundurduğumuzda bizi yapılarda petek kirişlerin tasarımına yöneltmiştir. Petek çelik kirişlerin yapı sektöründe daha çok kullanılmaya başlanması, inşa edilen çelik yapıların stabilitesini ve güvenilirliğini sağlamak için yapılmakta olup çok sayıda araştırmayı beraberinde getirmiştir. Petek kirişlerin ölü ağırlığının az olmasından ötürü gerek imalat aşamasının gerekse inşaa aşamasının hızlı olması sebebiyle inşaat sektöründeki zaman parametresine olumlu yönde etki etmektedir. Petek kirişlerin deprem kuşağında bulunan başta ülkemize ve tüm dünyada depreme dayanıklı yapıların yapılması ve deprem sonrasında oluşabilecek deformasyonların en aza indirilmesi adına önemli bir rol üstlenmektedir. Daha önce yapılan petek çelik kiriş tasarımları gerek deneysel gerek sayısal analiz testlerin de statik yükler altında yapılmışken deprem yükü altında petek kiriş çelik tasarımlarının analizi için yapılan deneyler sınırlı kalmıştır.

Bu çalışmada, petek kiriş tasarımlarının döngüsel yük altındaki davranışı literatürde çok detaylı bir şekilde ortaya koyulmamış olduğundan petek kirişlere döngüsel yük altında dayanımının artırılması için tasarımların geliştirilmesi hedeflenmektedir.

#### 1.1. Tezin Amacı

Çalışmamızın amacı uluslar arası (Boşluklu kirişlerin tasarım kuralları, İngiliz Standardı BS 5950 Bölüm 1: 1990) geometrik sınır şartlarına uygun şekilde tasarlanmış dairesel delikli petek kirişlerin döngüsel yükler altında ki davranışlarını incelemektir. Ayrıca söz konusu kirişlerde günümüz sanatını, sanayisini, bilmini derinden etkileyen,

## 1. GİRİŞ

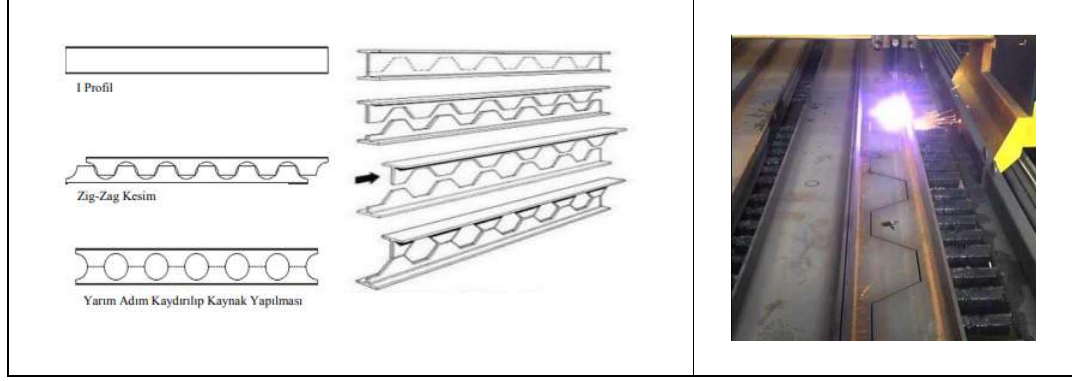
---

önemli dönemlerinden olan rönesans döneminde de sıklıkla kullanılmış, doğada ve geçmiş yüz yıllarda tasarlanan yapılarda etkisi olan altın oranı çelik petek kiriş tasarımlarımızda kullanıp dögüsel yük altında deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak altın orana göre tasarlanan petek kirişin davranışı incelenmiştir ve sınır şartlarına göre irdelenmiştir.

### 1.2. Petek Kiriş

Kirişler, yapılarda döşemenin ya da kullanım alanı yüklerini, yapı taşıyıcı sistemlerini oluşturan çerçeveleri kolona ya da duvar gibi düşey elemanlara aktaran çubuk yapı elemanlarıdır

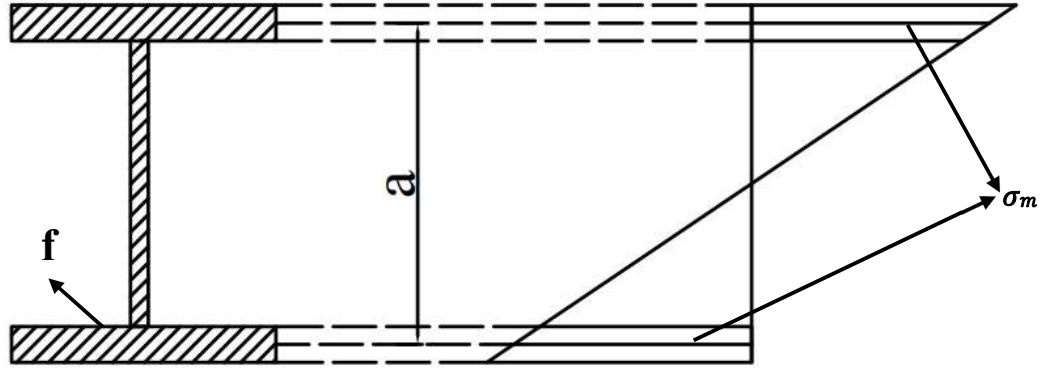
Petek kirişler üzerinde ilk olarak 1988'de Redford Üniversitesi Çelik Konstrüksiyonları Enstitüsü tarafından 1/1 ölçekli deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin amacı petek kirişlerin tasarımların davranışlarını incelemektir. Uzun açıklıklı kiriş sistemindeki gerilme yığılması problemini dairesel petek kirişlerle çözüme kavuşturdular. Bu zamandan sonra petek kirişler popülerlik kazandı. Petek kirişler H veya I tipi kesitli profillerin gövdeleri boyunca çeşitli torna aletleri ile zikzak veya S benzeri kesimle ayrılıp, ayrılan parçaların boşluklar oluşturulacak şekilde kaydırılarak kaynaklanması ile oluşturulan eski kiriş yüksekliğine kıyasla daha yüksek gövdeli kirişlere verilen addır. Hem gövde boyunca kesilip sonra kaynaklanarak elde edilirler hem de kirişler üzerine delikler açılarak da elde edilebilirler. Kesim sonrasında elde edilen parçalara ara levhalar ilave edilerek başlıklar arası mesafe büyütülerek daha yüksek bir kiriş de elde edilebilir. Petek kirişlerin ismi çoğunlukla kullanılan kirişlerde ki deliklerin altıgen formunda olmasından ötürüdür. Altıgen şekli için gövde boyunca kesilen profillerden elde edilen başlık parçalarının aralarına levhalar yerleştirilerek düzgün sekizgen formu da elde edilebilir. Ayrıca gövdelere dairesel formlar da verilebilir. Bu bahsedilen kirişlerin hepsine petek kiriş adı verilir. Günümüzde I profillerin gövdeleri istenilen şekilde özel lazer uçlu kesiciler yardımıyla kesilerek istenilen delik formu verilmektedir.



Şekil 1.1. Kesim ve birleşim şekilleri (Kaygısız 2019)

### 1.2.1. Boşluklu kirişlerin tercih edilmesi

Petek kirişler genellikle düzgün yaylı yüklerin taşınmasında ve aktarılmasında kullanılmaktadır. Çelik yapıdaki kirişler üzerine etkiyen yüke, buldukları açıklıklara, yapı tesisatının geçirilme şekline göre boşluklu veya kafes gövdeli olarak düzenlenmektedir. Kirişlerin açıklıkları büyüdükçe üzerine etki eden yüklerde artacaktır. Eğilmeye çalışan kirişlerin taşıma kapasitesi, diğer bir ifade ile eğilme momentleri kiriş yüksekliğinin karesi ile doğru orantılıdır. Çelik kirişlerin yük taşıma kapasitesini artırmak için kiriş yüksekliği artırılmalıdır (Şekil 1.2.). Bununla birlikte kullanılan kirişin ağırlığı da artmaktadır. Bu artış mühendisliğin ekonomiklik ilkesiyle bağdaşmamaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde uzun açıklığa sahip çelik yapıların taşıyıcı sistemlerinde ekonomik olarak kullanılması amacıyla petek kiriş sistemleri uygulanmaktadır. Petek kirişler, kiriş gövdesinde boşluklar oluşturularak kirişin daha yüksek gövdeye sahip olup profil tablosunda aynı yüksekliğe sahip olan profilden daha hafiftir. Ayrıca petek kirişlerdeki boşluklarda tesisat boruları gibi uzantısal sistemlerin geçirilmesine imkan sağlar. Petek kirişleri gövde boşlukları estetik ve ihtiyaç durumlarına bağlı olarak farklı geometrik şekiller uygulanabilir. Kiriş üzerindeki boşluklar sayesinde boyanacak yüzey azaltılmış olup, daha az ölü ağırlık ile daha çok yük taşınabilmiş geniş açıklık ve yüksek yapılar yapılmasına olanak sağlamış olur.



Şekil 1.2. Profil kesitindeki gerilme dağılımı (Kalaycıgil 2007)

Emniyetle taşıyabileceği moment yaklaşık;

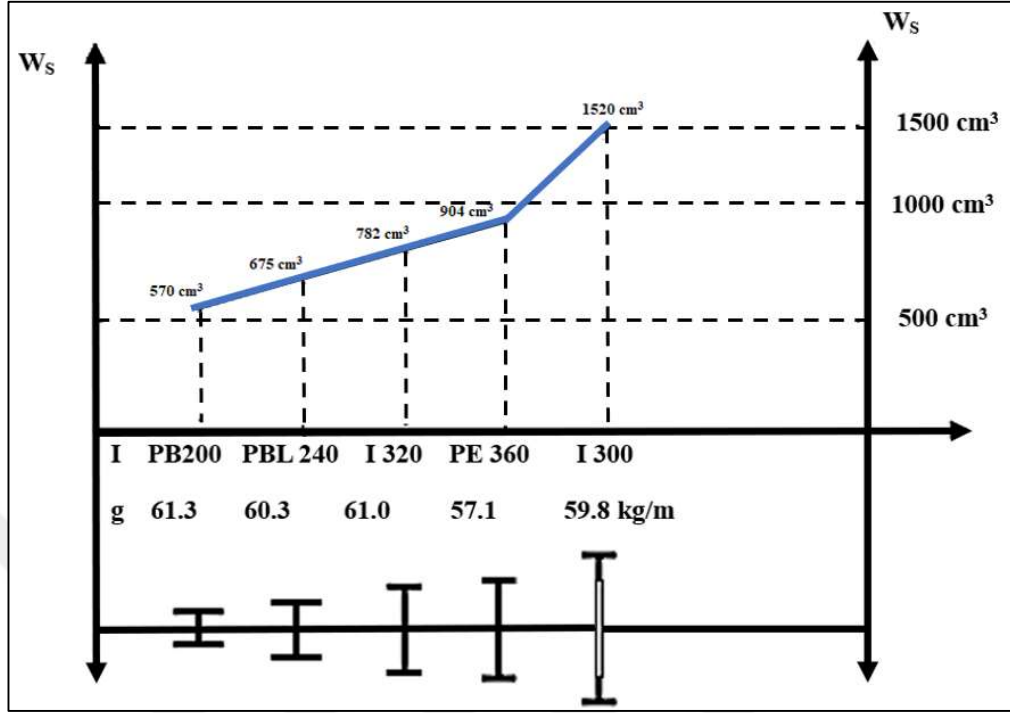
$$M = \alpha \times f \times \sigma_m$$

M: Güvenle taşıyabileceği moment

f: Kirişin başlık alanı

a: Kirişin başlıklarının ağırlık merkezleri arasındaki mesafe

$\sigma_m$ : Kirişin emniyetli gerilmesi



Şekil 1.3. I Profil ve petek kirişler arasındaki mukavemet momenti artışı (Kalaycıgil 2007)  $\text{cm}^3$ .

Deliksiz forma sahip aynı ağırlıktaki 5 tane I kesitli profilin yüksekliği artırıldıkça Taşıma kapasitesinde artış gözükmemektedir (Şekil 1.3.).

## 1.2.2. Petek kirişlerin imalat türleri

Petek kirişlerin imalatı 4 çeşittir. Bu imalat çeşitleri aşağıda sıralanmıştır;

### 1.El ile boşluk açılması

El ile kullanılabilen durumda olan makaslarla, el şaloması adı verilen alet yardımıyla ateşi yoğunlaştırarak elle kesim yapılabilir.

### 2. Yarı otomatik

Önce şablonlar ve şaloma aletleri ile kesilip sonra düzeltme ve kaynaklama başka bir makine ile otomatik yapılır.

## 1. GİRİŞ

---

### 3.Pres ile Zımbalama

1000 tonluk pres makineleriyle zımbalama işlemi yapan otomatik pres makineleriyle gerçekleştirilmektedir.

### 4.Özel ışınlarla kesme makineleriyle.

İmalatın tipinin seçim şekli maliyet ve tasarıma göre değişmektedir ancak 4. imalat tipi hem kesimin daha doğru ve estetik olması ve yüksek modern yapılarda kullanılan kirişlerin imalatı için daha ekonomiktir.

### 1.2.3. Gövdesi boşluklu kiriş türleri



Şekil 1.4. Dairesel boşluklu kiriş kesiti



Şekil 1.5. Angelina boşluklu petek kiriş kesit



**Şekil 1.6.** Hexagonal delikli petek kiriş (Altıgen formlu)

Gövdesinde açılan geometrik şekile göre türleri değişir. Şekil 1.4.'de gösterildiği gibi dairesel boşluğa sahip, Şekil 1.5.'de gösterildiği gibi angelina boşluğa sahip, Şekil 1.6.'da gösterildiği gibi altıgen boşluğa sahip türleri mevcuttur.

### 1.2.4. Petek kirişlerde göçme modları

Boşluklu kirişlerin tasarım kuralları, İngiliz Standardı BS 5950 Bölüm 1: 1990 şartnamesine göre petek kirişlerin tasarımlarındaki geometrik şekillerdeki önemli değişiklikler kirişte göçme modları oluşmasına ve düzensiz hareketlere sebep olabilir. Petek kirişlerin göçme modları ve nihai yük taşıma kapasiteleri, malzemenin özelliklerine, geometrik tasarımına ve deneysel koşullara bağlı olarak değişir. Çoğunlukla petek kirişlerde meydana gelen göçme modları şunlardır;

- Yanal burulmalı burkulma (LTB- Lateral torsional buckling)
- Bükülmeli burkulma (LDB- Lateral distortional buckling)
- Yerel başlık burkulması (LFB- Local flange buckling)
- Vierendeel mekanizması (VIER)
- Gövde Kaynak Bölgesinde Meydana Gelen Yırtılmalar
- Eğilme göçmesi
- Kayma nedeniyle gövde burkulması (WPB- Web post-buckling due to shear)
- Sıkıştırma (WBC-Web buckling due to compression) nedeniyle gövde burkulması.

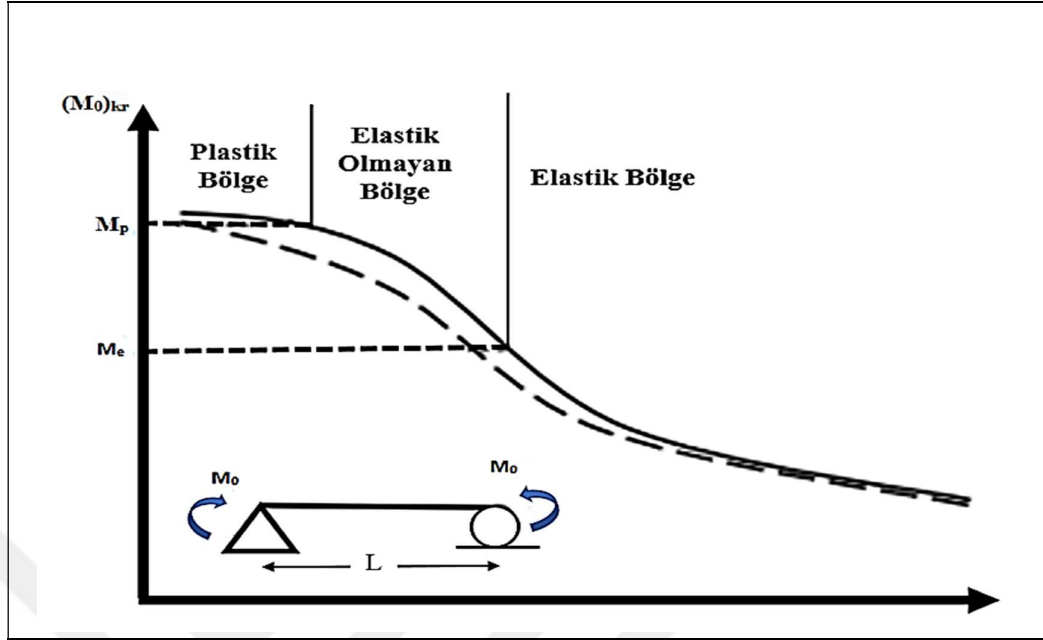
### **Yanal burulmalı burkulma (LTB)**

Çok açıklıklı kirişlerde eğilme etkisi altındaki kirişin yanal yer değiştirmeye ve dönmeye karşı engellenmediyse zayıf eksenlerin etrafındaki eğilme ve burulma dayanımları yetersiz kalabilir ve yanal burulmalı burkulma sebebiyle göçmeye maruz kalırlar. Bu yüzden yanal burulmalı burkulmaya maruz kirişin hem yanal deplasman yapması hem de dönmesi beklenir. Çok açıklıklı kirişlerde yanal burkulma oluşup kirişte göçme meydana gelir. Yapılan deneyler sonucunda petek kirişlerdeki gövde boşluklarının yanal burulmalı burkulma davranışı gövdesi delikli olmayan kirişler ile benzer olduğu anlaşılmış. Yanal burulma dayanımı etkileyen en önemli parametreler yüklemenin şekli, kesit geometrisi, ön kusurlar ve mesnetler arasındaki mesafe yanal burulmalı burkulma dayanımını etkiler.

Yanal burulmalı burkulma davranışının serbest açıklığa göre değişimi grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 1.7.a). Şekildeki kalın çizgi, kusursuz geometrideki basit mesnetli kiriş için kritik yük değerlerini göstermektedir. Kesikli çizgi ise geometrik ön kusur söz konusu olduğu durum içindir.

### **Gövde kaynak bölgesinde meydana gelen yırtılmalar**

İmalat aşamasında H ve I profilleri gövde boyunca kesildikten sonra kaydırmalı olarak birleştirilip veya aralarına levha yerleştirilerek kaynaklanarak oluşturulan petek kirişlerin kaynak bağlantılarında kopması deforme olması durumudur (Şekil 1.7. ve Şekil 1.8.). Birleşim bölgelerinde moment değerlerini azalması sonucunda kaynak uzunluğu kısa tutulur. Bu durumda kaynaklarda kopma, kopmaya bağlı olarak da kirişlerde göçme meydana gelir. Bu durumda oluşan göçme modu gövde kaynak bölgesinde meydana gelen göçme modudur.

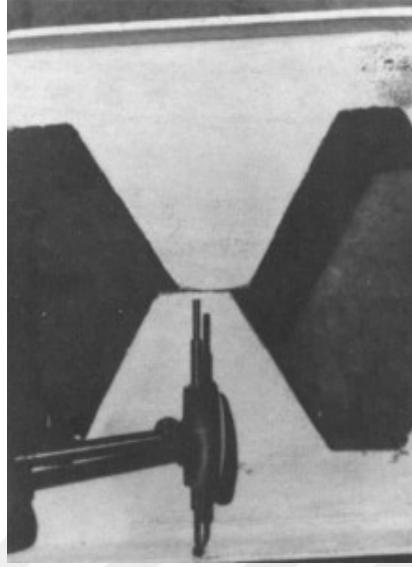


a. Yanal burulmalı burkulma dayanımının serbest açıklıkla değişimi (Ayhan 2007)



b. Dairesel kirişte yanal burulmalı burkulma (Sonck 2015)

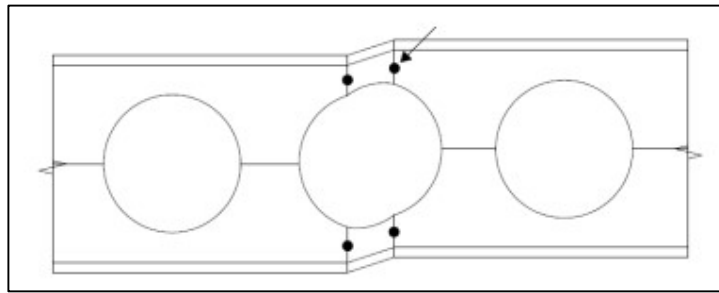
Şekil 1.7. Gövde kaynak bölgesinde meydana gelen yırtılmalar



**Şekil 1.8.** Kaynak bağlantısının yırtılması (Kaygısız 2019)

### **Vierendeel mekanizması (VIER)**

Petek kirişlerde kiriş boyunca moment değişimi ve yüksek kesme kuvvetinin gövde boşlukları boyunca iletilmesi ile ilgilidir. Vierendeel mekanizması çoğunlukla geniş açıklıklarda yatay eksen boyunca oluşur ve yüksek eğilme momentinin olduğu bölgelerde çekme ve basınç gerilmeleri bir göçmeye sebep olabilir. Bununla birlikte kesmenin hakim olduğu kısımlarda plastik mafsalları oluşumu görülebilir. Gövdedeki boşluk ya da boşluklar eksen boyunca kesme kuvvetinin iletilmesi ile Vierendeel eğilmesi oluşturur. Şekil 1.9. da gösterilmiştir.



**Şekil 1.9.** Dairesel kirişte yüksek kesme (Kaygısız 2019)

### Sıkıştırma (WBC) nedeniyle gövde burkulması

Nihai yük altında burkulma davranışı göstermeyen kirişte her iki kayma bölgesi çekme ve basınca karşı tamamen plastik olana kadar akma davranışı gösterirler. Hosain ve Speirs (1970) nihai yük altında 12 petek kiriş test etti. Kısmi enine destekle iki numuneye basınç nedeniyle gövde burkulması için üç bölümün göçtüğü, basınca bağlı gövde burkulma bükülmesi, yük altında kirişin gövde kısmı boyunca enine berkitmelerin kullanılması yoluyla önlenebildiği gözlemlendi.

#### 1.2.5. Petek kirişlerin geometrik tasarım prosedürü

Çelik petek bir kirişin yük altındaki tasarımı mukavemetinin ve kullanılabilirliğinin kontrol edilmesi gerekir. Petek kirişin kullanımında ortaya çıkan bazı kusurlar dikkate alınarak tasarımlarının yapılması beklenir. Özellikle eğilme ve kesme etkilerini dikkate alınarak yer değiştirme sınırlamaları, eğilme kapasitesi, kiriş kesme kapasitesi toplam kiriş burkulma mukavemeti, kiriş gövdesinin bükülmesi ve burkulması, Vierendeel mekanizması öne çıkan göçme modlarıdır. Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü (Ward 1990) Şekil 1.10.' de gösterdiği gibi tasarım prosedürü sunmuştur.

$$1,25 < H_s/D_0 < 1,75 \quad (1.1)$$

$$1,08 < S/D_0 < 1,5 \quad (1.2)$$

S: Dairesel boşlukların merkezleri arasındaki mesafe.

e: İki daire arasındaki en kısa mesafe.

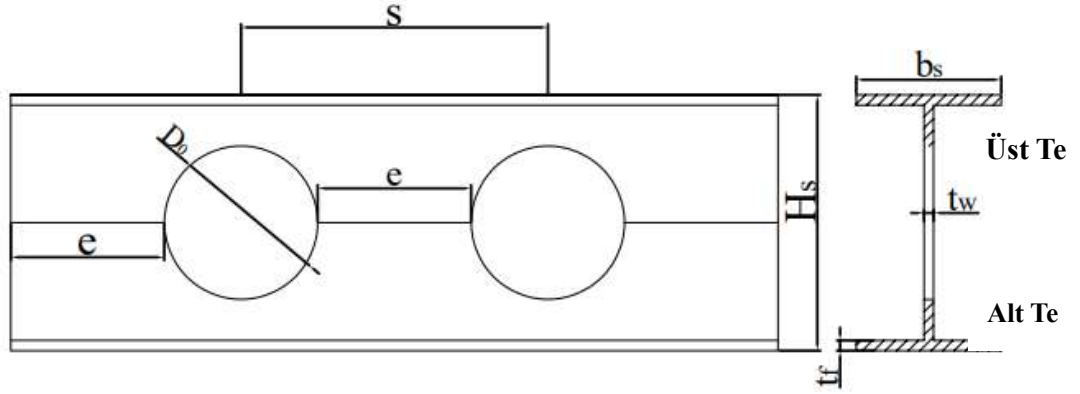
D<sub>0</sub>: Dairesel boşluğun çapı.

H<sub>s</sub>: Uygulama sonucu artan kiriş yüksekliği.

b<sub>s</sub>: Başlık genişliği.

t<sub>w</sub>: Gövde kalınlığı.

t<sub>f</sub>: Başlık kalınlığı.



Şekil 1.10. Boşluklu kirişin geometrik parametreleri (Erdal 2013)

### 1.2.6. Kullanım alanları

Petek kirişler tesisat malzemelerini yapıya zarar vermeden transferinin sağlanması ve estetik bakımda yapının daha hoş gözükmesine imkan sağladığından dolayı çok fazla alanda uygulanmaktadır. Kullanılan bazı alanlar aşağıdaki gibidir (Kalaycıgil 2007);

- Çatı aşıkları
- Hal kafes kirişleri (Şekil 1.11.)
- Hal kolonları
- Döşeme kirişleri
- Kat kirişleri
- Düz eksenli şed kirişler
- Kemer şeklinde şed kirişler
- Kompozit kat girişleri
- Yaya geçitleri
- Kren köprüleri
- Dolu gövdeli köprülerin gövde levhalar takviyesinde



Şekil 1.11. Hal kafes kirişleri (Kalaycıgil 2007)

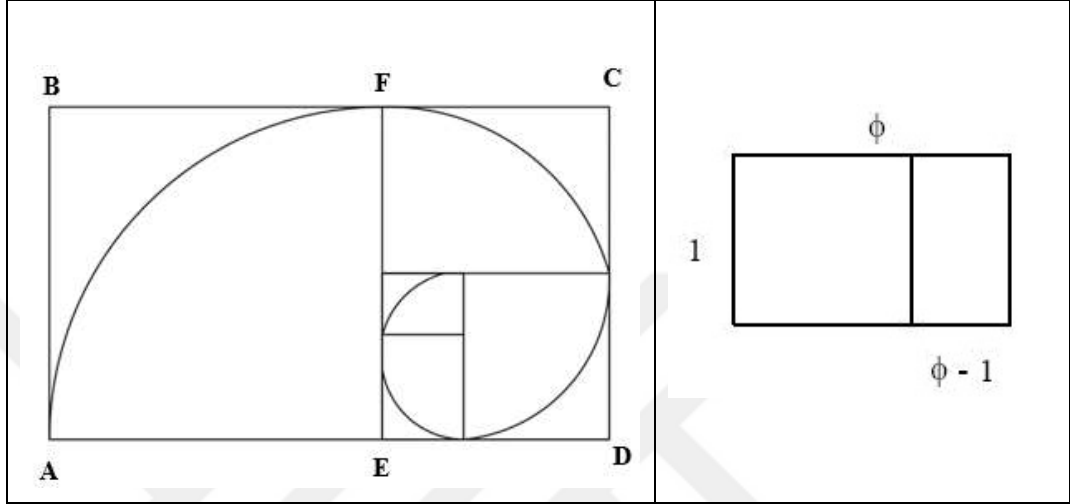
### 1.3. Altın Oran

Altın oran matematikte, fizikte, sanatta ve mimaride kullanılmıştır. Kainatın var oluşundan beridir olmasına rağmen ne zaman keşfedildiği veya kullanılmaya başlandığına dair herhangi bir bilgi bilinmemektedir. Geçmiş yüzyıllardaki yapılan eserlerde veya yapıtlarda bilerek mi kullanıldığı veya bilmeyerek mi kullanıldığı bilinmemektedir. Altın oran irrasyonel bir sayıdır ve yazılışı; 1,618033988749894...'tür. Sembol,  $\phi$  yani  $\phi$ 'dir. Rönesans'ta en popüler dönemini yaşamıştır (Güven 2009).

Altın oran  $\pi$  gibi biri irrasyonel sayıdır. Altın oran elde edilmesi için bir doğruyu öyle 2 parçaya ayrılmalıdır ki küçük parçanın büyük parçaya oranı büyük parçanın da bütün parçaya eşit olmalıdır. Bu durumda yaklaşık 1.618 değeri bulunur. İlk olarak 1509'da Luca Pacioli "İlahi Oran" adlı eserinde tanımlanmıştır. Aynı eserde Leonardo Da Vinci hazırladığı çizimlerde altın oranı Sectio Aurea olarak adlandırmıştır. Ortaçağın önemli matematikçilerinden Leonardo Fibonacci, 1202 yılında bitirdiği hesaplama kitabı adlı eserinde onluk sistemi nasıl aritmetik yapacağını anlatmıştır kitapta yer alan tavşan problemi tavşan popülasyonlarının çizelgesini yapılmasıyla Fibonacci ardışık sayılarının birbirine bölünmesiyle altın oran elde edilir. 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1.597, 2.584 Fibonacci sayılarıdır. Bu sayı altın olarak adlandırılır. Örnek:  $89/55 = 1,618$ ,  $377/233 = 1,618$ ,  $610/377 = 1,618$  gibi (Akdeniz, 2007, 5).

## 1. GİRİŞ

Altın dikdörtgen adı verilen dikdörtgenik şekli köşelerinden geçen çeyrek çemberlerle oluşturulan sarmal çizildiğinde (Şekil 1.12.) 2 köşegen çizginin uzunlukları oranı altın oranı vermektedir.

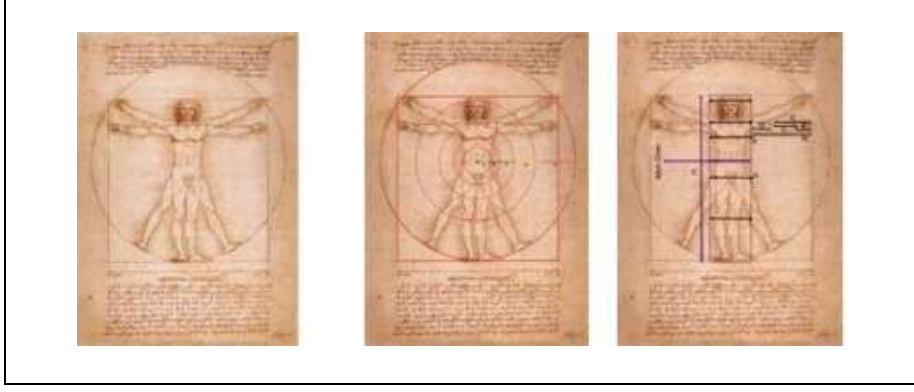


**Şekil 1.12.** Altın dikdörtgen kökenli logaritmik sarmal (Akdeniz 2007)

$AD/AB = AE/ED$  yazılır. Fakat  $FE=AE$  olduğundan,  $FE/ED=\Phi$  olur (Akdeniz 2007).

Pisagor'un altın oranla ilgili bir insanın tüm vücuduyla göbeğine kadar olan yüksekliğin oranı altın oranı eşit olduğu söylemiştir (Bergil 1993).

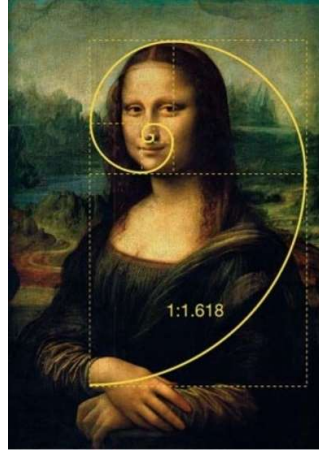
Mühendislik, mimari, resim, heykeltıraş, felsefe ve tıp gibi konulara hakim olan Leonardo Da Vinci Vitruvius Adamın da, (Şekil 1.13.) kolları 90 dereceyle yanlara açılmış bedeninin de kareye oturduğunu göstermektedir. Bu iki figür, insan betiminin temeli olarak kabul edilmiştir (Vinci 2006). Kolları ve bacakları açılıp gergin olarak, göbeği dairenin tam merkezine gelecek şekilde bir dairenin içine yerleştirilmiştir. Altın Oranlar dairelerle bölümlenerek gösterilmiştir.



**Şekil 1.13.** Leonardo Da Vinci Vitruvius adamı (Akademi müzesi)

Göbek ile diz arası mesafesinin diz ile ayak ucu arasındaki mesafenin oranı, göbek ile baş arasındaki mesafenin o hizasından başucuna olan mesafeye oranı altın orana eşit olduğunu göstermiştir (Seailles 2012).

Leonardo Da Vinci'nin Mona Lisa tablosu (Şekil 1.14.) Rönesans portre sanatının önemli bir yere sahiptir. Resimdeki Mona Lisa'nın başı ile omuzlara kadar olan bölümü dikdörtgen içine alındığında bu dikdörtgenin altı dikdörtgen olduğu görülmektedir. Bu dikdörtgen içerisinde portreyi içine alan karede gözün karenin merkezi olduğu tespit edilmiştir.



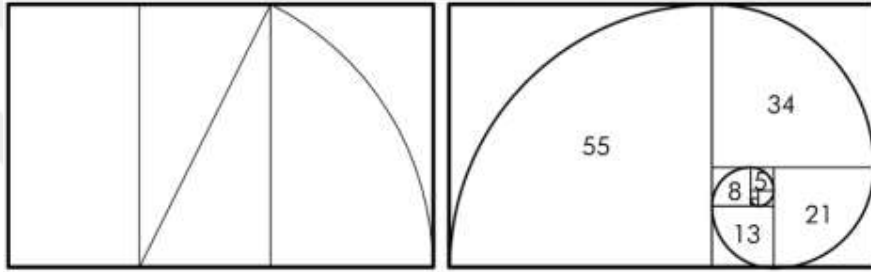
**Şekil 1.14.** Mona Lisa tablosu ve altın spiral (Akdeniz 2021)

Üst çenenin önündeki iki dişin oluşturduğu dikdörtgenin eninin boyuna oranı altın oranı verir (Tekkanat 2006).

## 1. GİRİŞ

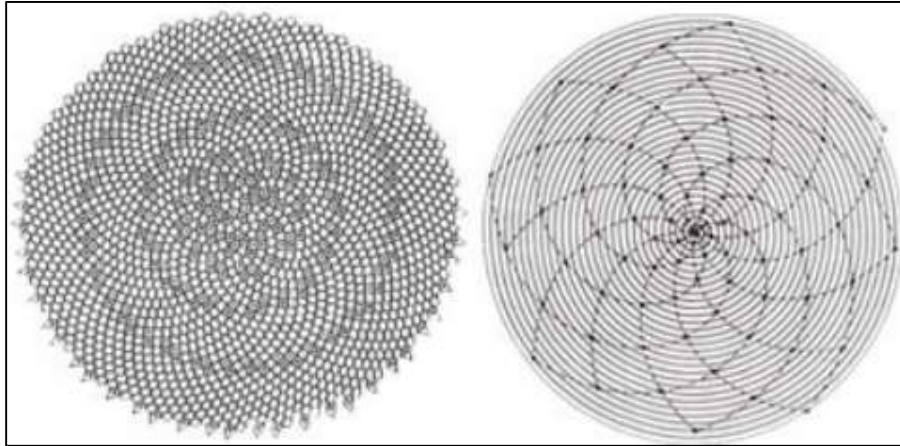
İnsan kolunu dirsek 2 bölüme ayırır büyük bölüm ve küçük bölüm bütün kol boyunun küçük bölüme oranı altın oranı verir (Tekkanat 2006).

Altın spiralin oluşumu (Şekil 1.15.) kısa kenarı 1 br uzun kenarı altın oran br kadar olan bir dikdörtgen oluşturuyoruz Uzun kenarı altın orana göre bölüyoruz Sonrasında oluşan dikdörtgenleri de içeriye doğru aynı şekilde bölüyoruz sonrasında bu kenarlara teğet geçen bir spiral çiziyoruz Oluşan bu spiralli yapı doğada çoğu yerde keşfedildi. Buradan da ek olarak  $1+1/\Phi=\Phi$  dir.



**Şekil 1.15.** Altın dikdörtgen ve altın spiralin (Selçuk 2009)

Ayçiçeğinin üstünde (Şekil 1.16.) bulunan tanelerinin merkezinden dışarıya doğru sağdan sola ve soldan sağa doğru sayılıp oranlandığında altın oranı verdiği görülmüştür (Lawlor 2002).

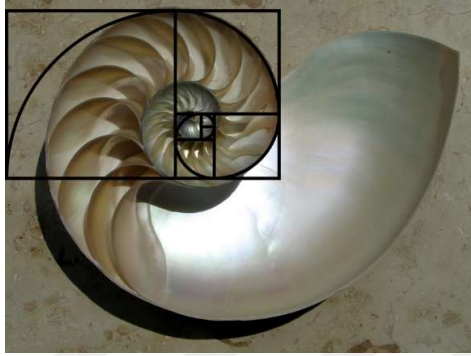


**Şekil 1.16.** Ayçiçeği fibonacci sayıları analizi (Dunlap 2003)

Her papatyanın ortasından saat yönüne 34 tane Spiral varken saat yönünün tersine 21 tane spiral vardır. Bu sayıları birbirine oranı altın oranı vermektedir (Lawlor 2002).

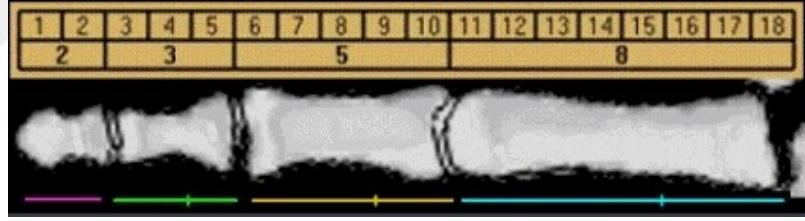
## 1. GİRİŞ

Midye kabuklarının (Şekil 1.17.) yapısı incelendiğinde yapıda ki eğriliğin tanjantı altın oranı vermektedir (Beyoğlu 2020).



Şekil 1.17. Midye kabukları (Selçuk 2009)

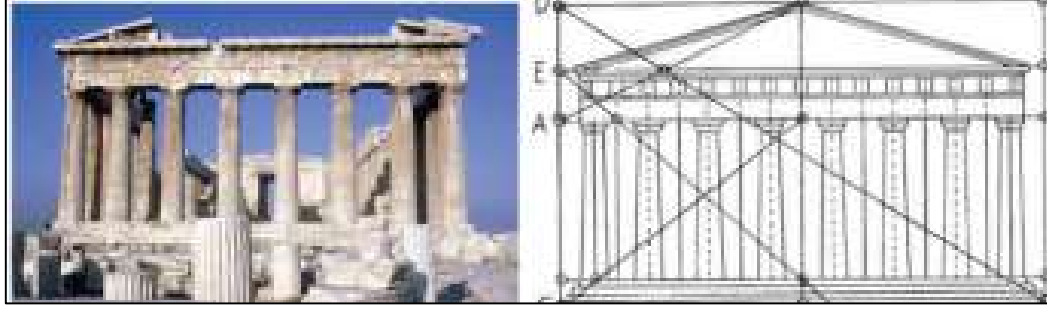
Parmaklarımızın tümünün boyunun üst boğumuna oranı altın oranı vermektedir.



Şekil 1.18. İnsan parmağının altın oran gösterimi (Tekkanat 2006)

Klasik orkestralarda kullanılmakta olan kornanın tasarımında altın oran göze çarpmaktadır. Altın oran çalgıya estetiklik katmakla birlikte kullanımı ve çalma açısından ergonomik kolaylık sağlamaktadır.

Yapılan araştırmalarda Parthenon tapınağında (Şekil 1.19.) denge ve uyum özelliği sağlanmasında Parthenon oluşturan parçaları altın oranı uyumluluğu göze çarpmıştır.



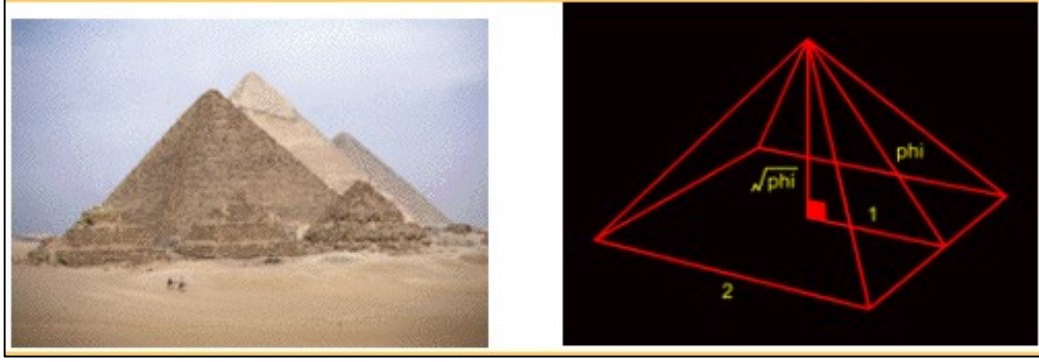
Şekil 1.19. Parthenon cephesi altın oran uyum çalışması (Ghyka 1977)

Fibonacci serisine göre geliştirilen ölçüm aleti olan Altın Oran Kumpası (Şekil 1.20.) çevredeki pek çok canlı ve cansız yapılarda kullanılarak incelemeler yapıldı. Kuşlar da tavus kuşunun kanadındaki motiflerde çiçeklerde böceklerde bu oran tesbit edildi. Hala aktif olarak heykel tasarımında ve diş hekimliğinde kullanılmaktadır (Selçuk 2009).



Şekil 1.20. Altın oran kumpasını yardımıyla doğada görülen altın oran örnekleri (Selçuk 2009).

Altın Oran mimaride etkisi çok fazla olmuştur. Çin'in bir şehri olan yasak şehir yerleşke planı, Keops Piramidi (Şekil 1.21.), Mısır'daki Giza piramitlerinin kütleli ilişkisi, Noterdam'ın cephesi, Tunus Kayravan'daki Büyük caminin minaresi Marsilya konutlarının cephe tasarımı, Birleşmiş Milletler New York Office binasının kütle oranları, Pentagon binasının plan şeması, CN Tower'ın kule güverte oranları mimaride altın oranın öne çıktığı eserler olarak sayılabilir (Fletcher 2001; Olsen 2006).



Şekil 1.21. Keops piramidi (Selçuk 2009)



### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Chung ve arkadaşları (2001) dairesel deliklere sahip petek kirişlerdeki Vierendeel mekanizmasını analitik çalışmalar bağlı bir inceleme yapmıştır. Çalışmalarında gövde açıklığı hem yüksek hem de düşük moment uygulanarak plastik mafsallarla mevcut tasarım yöntemi arasındaki ilişkiyi incelemiştir.

Liu ve arkadaşları (2003) gövde açıklıkları, şekli ve boyutları farklı olan çelik kirişler üzerinde sonlu elemanlar modelleme yöntemiyle gövde açıklıkları, şekil ve boyut arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu sonlu eleman modeli çelik kirişlerin test sonuçlarına göre sekiz düğümlü izoparametrik kabuk eleman modeline dayanmaktadır. Çeliğin yapısal özellikleri detaylı olarak incelenmiş, farklı gövde açıklığına ait çelik kirişlerin kesme kuvveti ve moment uygulandığında benzer şekilde davranıldığı bulunmuştur. Farklı açıklık ve boyutlarda olan delikli çelik kirişlerin yapısal özelliklerinin benzer olduğu sonucuna varmışlardır.

Amr (2011) dairesel boşluklu çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulması (LTB/LDB) üzerine çalışma yapmışlardır. Çok sayıda dairesel boşluklu çelik kiriş için kritik burkulma momentini ve buna karşılık gelen burkulma modunu belirlemek için üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesi kullanılmıştır. Oluşturulan kirişin kritik burkulma momentine karşılık gelen temel burkulma modunu belirlemek için kapsamlı bir sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Modellenen kirişlerin orta noktalarına konsantre yük ve yaylı yük uygulanmıştır. Yaylı yük uygulanan kirişlere göre daha yüksek moment taşıma kapasitesine sağladığı tespit edilmiştir. Gövdesi ince plakalı ve büyük delik çapına sahip çelik kirişler kayma deformasyonlarına daha yatkın olduğunu ve bu tür kirişler, önemli ölçüde uzun açıklıklara sahip olmadıkça, yanal burkulma (LTB veya LDB) modları oluşma olasılığı çok düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Tsavidaridis (2011) delik merkezleri arasındaki mesafeleri farklı olan dairesel boşluklu çelik kirişlerin davranışlarını incelemiştir. Deneysel ve ANSYS programını kullanarak analitik bir inceleme yapmıştır. Deneylerinde beş dairesel boşluklu yedi numune kullanmıştır. On dört adet sayısal test numunesi tasarlayarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapmıştır. Çıkan sonuçları karşılaştırmıştır. Sonlu elemanlar

analizlerinde gövde açıklığı  $1.131 \times D_0$ 'dan ( $D_0$ =delik çapı) büyük olduğunda ki numunenin maksimum kayma gerilimleri daha düşük bulmuştur. Gövde açıklığı  $1,3 \times D_0$ - $1,2 \times D_0$  aralığı içinde olan numunelerde çok yüksek kesme gerilimleri gösterdiği bulunmuştur.

Ellobody (2012) boşluklu çelik kirişlerin kesit geometrilerinin burkulma davranışına ve çelik mukavemetindeki değişikliğin etkilerini incelemek için doğrulanmış sonlu elemanlar modeli kullanılarak 120 adet delikli petek kirişi içeren kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmaların sonucunda gövde burkulması ve gövde burkulma sonrası göçen boşluklu çelik kirişlerin göçme yüklerinde önemli bir azalma sergilediğini göstermiştir.

Erdal ve arkadaşları (2013) optimum şekilde tasarlanmış dairesel boşluklu çelik kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesini incelemişler. Bunun içinde deneysel ve ANSYS programını kullanarak analitik çalışma yapmışlar. Deney ve sonlu elemanlar analizine göre sonuçlarını kıyaslamışlardır. Deneylerinde 3 metre uzunluğunda olan Üç tipte NPI\_CB\_240, NPI\_CB\_260 ve NPI\_CB\_280 I-kesit kirişi vardır. Her numune için dört test yapılmıştır. Bu numunelere üst başlığın ortasından eğilme deneyi yapılmıştır. Tasarlanan kirişler BS 5950 yönetmeliğine göre uygulanmıştır. Deneylerin yanal hareketleri önlenmiş ve NPI\_240 kesit kirişleri üzerindeki diğer iki numune için gövde burkulma göçme modu tanımlanmıştır. Ayrıca NPI\_260 kesit kirişler üzerindeki deneysel testlerin analizinden elde edilen sonuçlarda, deliklerin çevresine yük uygulandığının ve dört kirişin tamamında Vierendeel mekanizması ve gövde burkulmasının görüldüğünü tespit etmiştir.

Sonck ve arkadaşları (2014) dairesel boşluklu çelik kirişler şekil değiştirmelerini deneysel olarak incelemişler. Bunun için IPE 160 petek kirişler üzerinde deneysel çalışmalar yürütmüşler. Kirişlerin imalat sürecinden kaynaklanan şekil değiştirmelerin burkulmalar ve taşıma gücü bakımından zararları olacağı sonucuna varmışlardır.

Wang (2016) petek kirişlerin gövde burkulması davranışlarını ABAQUS program kullanarak incelemişler. Programda NPI\_240 ve NPI\_280 profillerini altıgen boşluklar oluşturarak modellediler. Sonlu elemanlar analizi sonucunda kullanılan numunenin gövde

kalınlıklarının başlık ve kalınlıklarının kesme nedeniyle gövde burkulma (WPB) etkisini incelemişlerdir.

Kang ve arkadaşları (2021) dairesel boşluklu kirişler üzerinde delik genişliği, delik konumu ve delik sayısının kesme dayanımı üzerine olan etkisini incelemişler. Deneyde sekiz adet dairesel delikli kiriş kullanmışlar. Numunelerde açılan deliklerin merkezleri arasındaki mesafenin artmasıyla petek kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesinin az miktarda arttığını bulunmuşlar. Aynı çapa sahip dairesel deliklerin sayısındaki artış delikler arasındaki mesafenin kısalmasına ve bundan dolayı nihai yük taşıma kapasitesinde azalmaya yol açtığını ve bundan dolayı kesme nedeniyle gövde burkulması (WPB) ve Vierendeel mekanizması (VIER) oluştuğunu tespit etmişler. Vierendeel mekanizması gözlemlenen T-kesitlerde plastik mafsalları oluştuğunu tespit etmişler. Kesme nedeniyle gövde burkulması gözlemlenen numunelerde deliklerde burkulmalar gözlemlenmiş. Bu numuneler ABAQUS programı kullanılarak kıyaslanmışlardır. Bulunan değerlerin sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulamışlardır.

Bi ve arkadaşları (2021) yük aktarımına dayanıklı petek kirişlerin, kiriş-kolon bağlantılarının çok parametreliliği deprem davranışını incelemişler. Altıgen delikli kirişlerin döngüsel yükler altında kompozit malzemeli ve delik çaplarının değiştirilerek deneysel ve ABAQUS programı kullanılarak davranışlarını incelemişler. Otuz sekiz tane 1/1 ölçekli petek kirişin kapsamlı bir sonlu eleman analizini yapmışlar. Modelleri deneysel sonuçlara göre doğrulamışlardır. Kompozit hareketin ilk deliğin çevresinde gerilme dağılımını iyileştirebileceğini ve bağlantı noktalarının taşıma kapasitesi ve sünekliliği belirli bir dereceye kadar artıracağını bulmuşlardır.

Morkhade ve arkadaşları (2022) üst başlıkları levha ile güçlendirilmiş çelik petek kirişlerin burkulma performansını incelemişler. Kiriş yüksekliği 300 mm olan numunelerin başlıkları plakaları ile güçlendirilmiş. Kiriş üzerinde açılan deliklerin merkezleri arasındaki mesafe  $1,1x D_0$ ,  $1,2x D_0$  ve  $1,3x D_0$  arasında değişmektedir. Burada " $D_0$ " delik çapıdır. Oluşturulan modeller ABAQUS programında analiz edilmiştir. Tasarlanan deliklerin merkezleri arasındaki mesafe, deliklerin çapının 1,1 ( $1,1x D_0$ ) katından daha az olduğunda, petek kirişlerin taşıma mukavemeti üzerinde daha iyi bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişler.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Ferreira ve arkadaşları (2022) eliptik deliklere sahip petek kirişlerin kesme nedeniyle gövde burkulmasını ABAQUS araştırmışlar. Ouşturdukları geomerik tasarımları ABAQUS programına modellenerek analizini sağlamışlardır. Kesme nedeniyle gövde burkulmasına direncini tahmin etmek için bir tasarım yaklaşımı önermişlerdir. Bu tasarım yaklaşımında bir güvenlik analizi ile onaylanmışlar. Eliptik delikli kirişlerin petek kiriş tasarımı için uygun olduğu tespit etmişler.

Sayed (2022) gövdesinde boşluk bulunmayan kirişlerin ve farklı geometrik şekillere sahip delikli kirişlerin azaltılmış kalınlıklı levhalardan oluklar oluşturarak mukavemeti ve taşıma davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada çelik kirişlerin verimini artırmak için kirişlere levhalar ile oluklar oluşturmuştur. Düz ve oluklu gövdeye sahip ve farklı delik çapına sahip elli bir adet çelik kiriş üzerinde sonlu elemanlaranalizi gerçekleştirilmiş. Gövdede bulunan oluk boyutları, delikler arasındaki mesafeden daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ve dikdörtgen boşluklu kirişin verimliliği dairesel boşluklu kirişe göre daha fazla etkiye sahip olduğunu tespit etmiştir.

Silva ve arkadaşları (2022) angelina boşluklu kirişlerde burkulma ve burkulmasını incelemişler. Çalışmalarında ABAQUS programını kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Analizlerinde uzunlukları 6 m ile 32 m arasında değişen, IPE tipi on adet I kesit modelleyerek incelemişler. Angelina boşluklu kirişler için standart prosedürlerin yanal burulmalı burkulma (LTB) davranışı incelenmişler. Mühendislik projelerinde en sık karşılaşılan durum olmasına rağmen üst başlığa uygulanan işlemlerde AISC-360 standartının güvensiz olduğunu tespit etmişler.

Luo ve arkadaşları (2022) yoğun yük altında petek çelik kirişler üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Düzensiz dinamik yüklerin petek çelik kirişler üzerindeki etkisini sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlar. Ağırlık düşürme darbe testine dayanan bu çalışmada, petek çelik kirişler için sayısal bir model oluşturmak üzere sonlu elemanlar programı ABAQUS'u kullanmışlar. Bu çalışma çarpma işlemi sırasında petek çelik kirişlerin gövde gerilme gelişimini araştırdılar ve darbe hızının, darbe kütesinin, Gövde bulunan boşluğun kiriş yüksekliği oranına etkisini değerlendirmek için bir parametre analizi gerçekleştirmişler. Ağırlık düşürme darbe testi için, kiriş uzunluğu 2.400 mm ve hesaplama uzunluğu 2.120 mm 300 x 150 x 8 x 10 mm kesit boyutlarına sahip toplam

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

sekiz adet petek çelik kiriş tasarlanmıştır sınır şartlarına göre modellenen kirişlerin analizde yükleme işlemi sırasında, önce maksimum kesme kuvveti ortaya çıktığı, ardından maksimum eğilme momenti ve maksimum sehim olduğu tespit edilmiş. Gövde yüksekliğinin kiriş yüksekliğine oranı 0,5 ile 0,7 arasındayken, petek çelik kirişin maksimum sehimi kademeli olarak artmış ve delik çapının kiriş yüksekliğine oranı arttıkça maksimum kesme kuvveti ve maksimum eğilme momenti kademeli olarak azaldığını tespit etmişler.

Guo ve arkadaşları (2023) hibrit yüksek mukavemetli çelik kompozit boşluklu kirişin düşük döngüsel yükleme altında mekanik performansını incelemişler. İncelemeler sırasında çelik petek kirişlerin neden olduğu yapısal yük taşıma kapasitesi ve rijitlikteki bozulmaları onarmayı amaçlamışlar. Çalışmalarında kiriş başlıklarında, yüksek mukavemetli çelik ve gövdede sıradan çelik kullanan yeni bir hibrit yüksek mukavemetli çelik kompozit petek kiriş önermişler. Deneysel olarak çerçeve yapısındaki rijit bağlantı ile bükülme noktası arasındaki bir kompozit petek kiriş seçilmiş ve bir kirişlerdeki maksimum yük kapasitesi ve buna karşılık gelen sapmanın daha önce bildirilen deneysel sonuçları, mevcut sonuçların doğrulanması sırasında karşılaştırma için kullanmışlar. Çelik kompozit petek kiriş ve dört yüksek mukavemetli numune üzerinde düşük döngüsel yükleme testleri gerçekleştirilmişler. Yüksek mukavemetli çelik ve sıradan çeliğin hibrit kullanımının modları, yük taşıma kapasiteleri, mukavemet ve rijitlik bozulması üzerindeki etkileri, süneklik ve kompozit boşluklu kirişlerin enerji dağıtma kapasiteleri incelemişler. Hibrit yüksek mukavemetli çelik kompozit petek kiriş numunelerinin yerel plastik hasar sergilediğini tespit etmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Deneysel Çalışmalar ve Numuneler

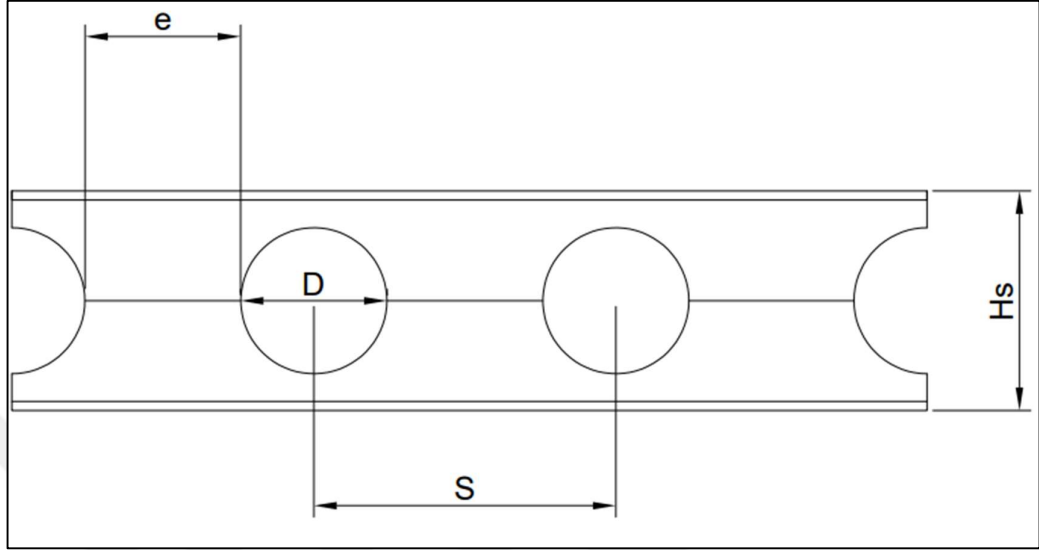
Tezimizde çelik yapılarda kullanılan petek kirişlerin geometrik sınır şartlarının ve altın oran ile tasarlanan ve petek kirişlerin döngüsel yükler altındaki davranışını ve performansları incelendi. Literatürde yaygın olarak kullanılan petek kiriş deneylerinde genellikle kullanılan IPE 240 profili bu çalışmada da kullanılmıştır. IPE 240 profili kullanılarak aşağıda hesaplaması verilmiş olan delik çapları ve delikler arasındaki mesafelere göre delikler açılmış, üst uç noktasında ve her iki tarafından 10 mm lik berkitme levhalarıyla kaynatılmış, diğer uç noktasında 12 mm lik alın levhası ile kaynaklanmış 5 farklı delik çapına sahip petek kiriş kullanılmıştır (Çizelge 3.1.). Deney sırasında FEMA-350 yükleme protokolündeki genlik ve döngü sayıları kullanılmıştır.

Farklı delik çaplarına sahip deney numunelerine FEMA-350 yükleme protokolü uygulaması bitene kadar kiriş üzerinde ve birleşimlerinde deformasyonlar ölçüldü. Sonuçlarla ilgili detaylı bilgiler analiz kısmında anlatılmıştır.

**Çizelge 3.1.** Numunelerin boyutları

Numuneler Adları	L=Kiriş Boyu (mm)	H=Kiriş Yüksekliği (mm)	D=Delik Çapı (mm)	S=Delikler Arasındaki Mesafe(mm)
EXP-PERFECT	2.400	240	-	-
EXP2-D137	2.400	240	137	205
EXP3-D148	2.400	240	148	205
EXP4-D160	2.400	240	160	205
EXP5-192	2.400	240	192	205

#### 3.1.1. Kirişlerde dairesel boşlukların oluşturulması



Şekil 3.1. Dairesel boşluklu kirişlerin imalatında

Şekil 3.1.'deki kirişin dairesel boşluklarını oluştururken aşağıda verilen geometrik sınır şartlara dikkat ederek tasarımlarımız yapılmıştır. Deneyde bu geometrik sınır şartları elde ederken kullandığımız parametreler kiriş yüksekliği, dairenin delik çapı ve oluşturulan delikler arasındaki mesafedir. Diğer parametrelerde aşağıda verilmiştir.

S: Dairesel boşlukların merkezleri arasındaki mesafe.

e: İki daire arasındaki en kısa mesafe.

D<sub>0</sub>: Dairesel boşluğun çapı.

H<sub>s</sub>: Uygulama sonucu artan kiriş yüksekliği.

Geometrik Sınır Şartlar;

$$1,25 < H_s/D_0 < 1,75$$

$$1,08 < S/D_0 < 1,5$$

#### 3.1.2. Numunelerin geometrik sınır şartları için uygunluk kontrolü

##### **EXP5 192 NUMUNESİ;**

H<sub>s</sub>=240 mm için

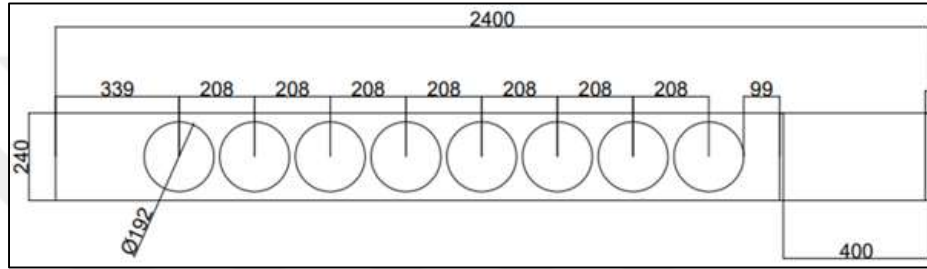
$$H_s/D_0 = 1,25 \Rightarrow D_0 = 240/1,25 \Rightarrow D_0 = 192 \text{ mm}$$

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

S= 208 mm için

$S/D_0=1,0833$  (SINIR ŞARTI SAĞLAMAKTADIR)

Deneyde kullanılan numunelerden geometrik sınır şartların en küçük şartı olan kiriş yüksekliğinin delik çapına oranı 1.25'e eşitlendiğinde kiriş yüksekliği 240 mm, delik çapı 192 mm, deliklerin merkezleri arasındaki mesafe 208 mm olan Şekil 3.2.'deki tasarım elde edilmiştir.



Şekil 3.2. EXP5-D192 numunesinin geometrik şekli

#### **EXP4 160 NUMUNESİ:**

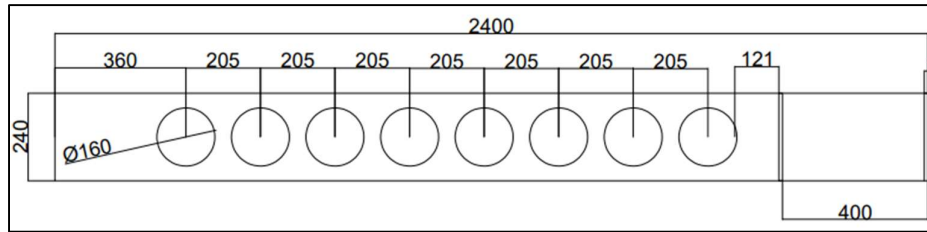
$H_s=240$  mm için

$H_s/D_0 = 1,5 \Rightarrow D_0=240/1,5 \Rightarrow D_0=160$  mm

S= 205 mm için

$S/D_0=1,281$  (SINIR ŞARTI SAĞLAMAKTADIR)

Deneyde kullanılan numunelerden geometrik sınır şartların orta noktası olan kiriş yüksekliğinin delik çapına oranı 1,5'e eşitlendiğinde kiriş yüksekliği 240 mm, delik çapı 160 mm, deliklerin merkezleri arasındaki mesafe 205 mm olan Şekil 3.3.'deki tasarım elde edilmiştir.



Şekil 3.3. EXP4-D160 numunesinin geometrik şekli

#### **EXP3-D148 NUMUNESİ (H<sub>s</sub>/D<sub>0</sub>'I ALTIN ORANA GÖRE TASARLANAN NUMUNE);**

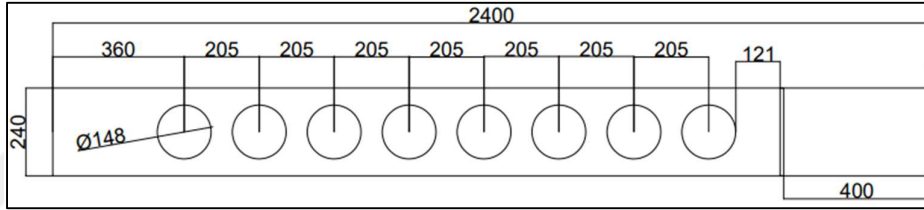
H<sub>s</sub>=240 mm için

H<sub>s</sub>/D<sub>0</sub> = **1,618 (ALTIN ORAN)** ⇒ D<sub>0</sub>=240/1,618 ⇒ D<sub>0</sub>=148,33 mm

S= 205mm için

S/D<sub>0</sub>=1,382 (SINIR ŞARTI SAĞLAMAKTADIR)

Deneyde kullanılan numunelerden geometrik sınır şartların içinde olan kiriş yüksekliğinin delik çapını oranı altın orana yani 1,618'e eşitlendiğinde kiriş yüksekliği 240 mm, delik çapı 148 mm, deliklerin merkezleri arasındaki mesafe 205 mm olan Şekil 3.4.'deki tasarım elde edilmiştir.



Şekil 3.4. EXP3-D148 numunesinin geometrik şekli

#### **EXP2 137 NUMMUNESİ;**

H<sub>s</sub>=240 mm için

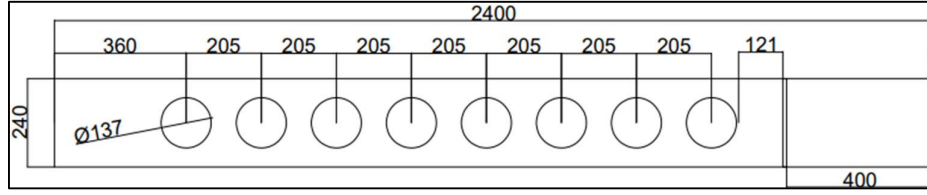
H<sub>s</sub>/D<sub>0</sub> = 1,75 ⇒ D<sub>0</sub>=240/1,75 ⇒ D<sub>0</sub>=137,143 mm

S= 205 mm için

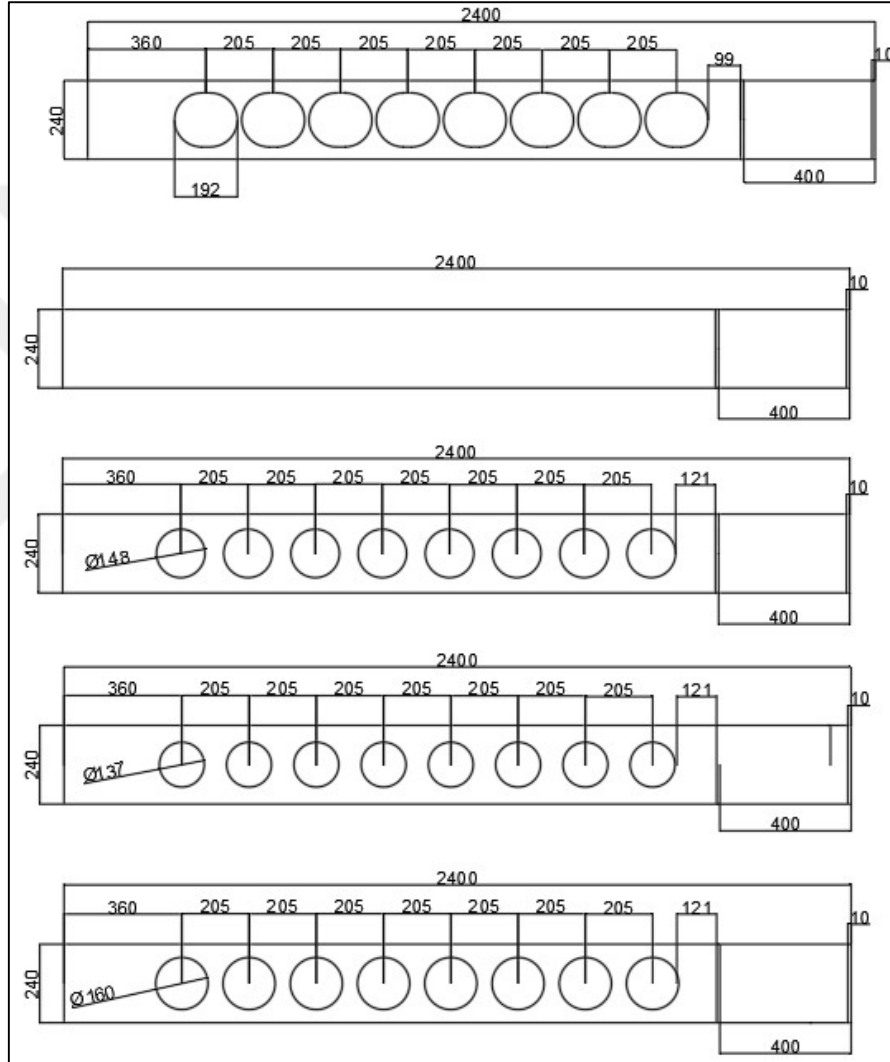
S/D<sub>0</sub>=1,494 (SINIR ŞARTI SAĞLAMAKTADIR)

Deneyde kullanılan numunelerden geometrik sınır şartların en büyük şartı olan kiriş yüksekliğinin delik çapına oranı 1,75'e eşitlendiğinde kiriş yüksekliği 240 mm, delik çapı 137 mm, deliklerin merkezleri arasındaki mesafe 205 mm olan Şekil 3.5.'deki tasarım elde edilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

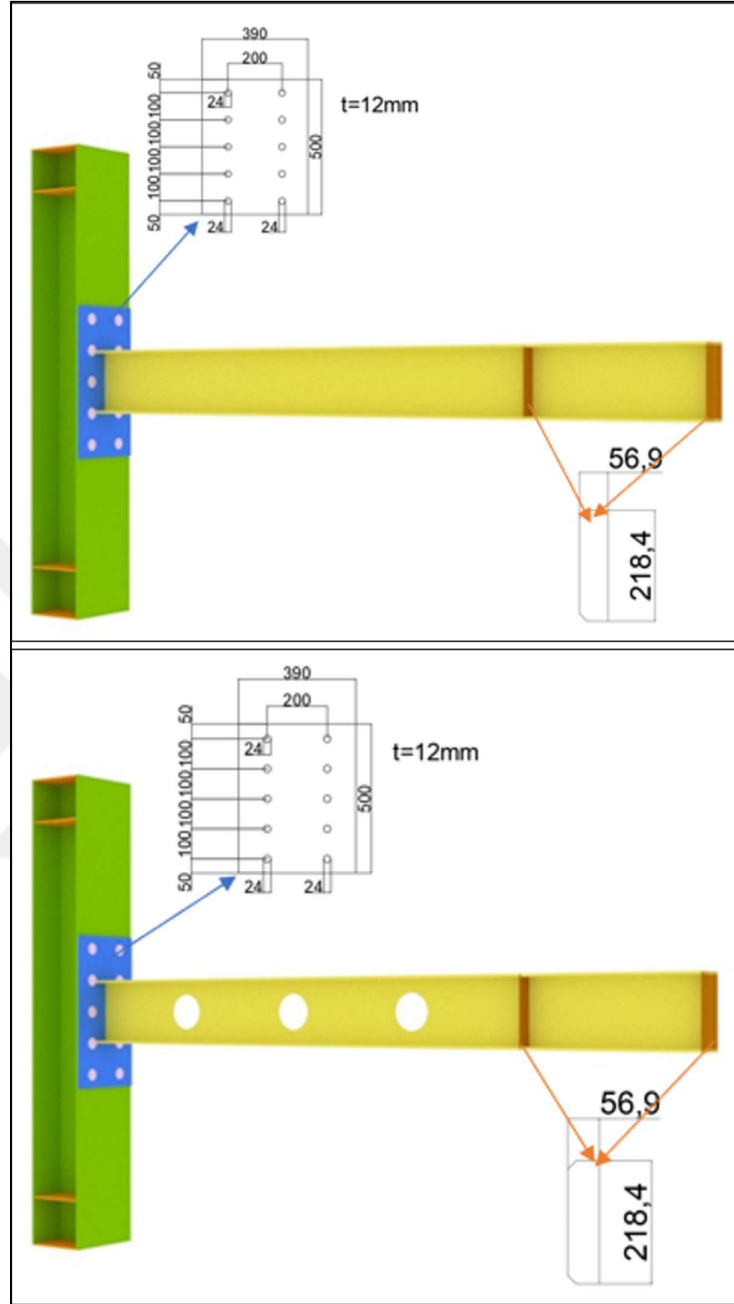


Şekil 3.5. EXP-D137 numunesi geometrik şekli



Şekil 3.6. Deneyde kullanılan petek kirişlerin detayları

Deneyde kullanılan bütün numunelerin çizimleri Şekil 3.6.' da verilmiştir. Deneyde kullanılan numunelerin geometrik şekillerinin karşılaştırılmasında yapılabilir. Şekil 3.7.'de gösterildiği gibi deney numuneleri ve alın levhası, berkitme levhaları detayları gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Deneyde kullanılan numunelere ait modeller

## 3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler

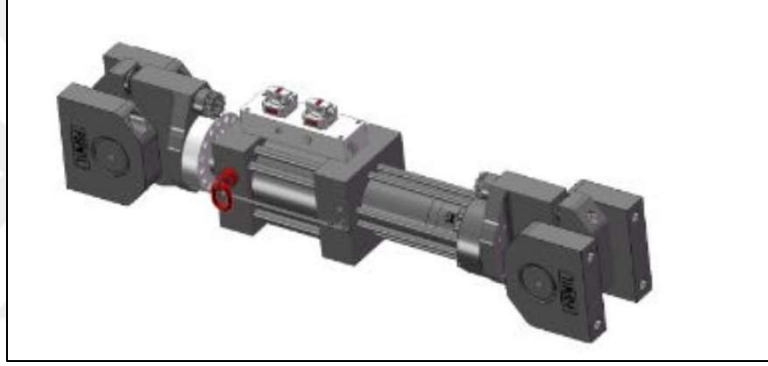
### 3.2.1. Hidrolik dinamik aktüatör

Hidrolik aktüatörler (Şekil 3.8.) kullandıkları yere göre nesnelerin şeklini değiştirebilen hareket ettirebilen durdurabilen mekanik cihazlardır. Hidrolik

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

aktüatör sıvıların sıkıştırılmaz ilkesine göre tasarlanmış cihazlardır hidrolik aktüatörler silindir piston ve hidrolik sıvıdan oluşur. Deneyle sırasında kullanılan hidrolik aktüatör elektrik enerjisi ile çalışmaktadır elektrik enerjisi ile içinde bulunan yağın bulunduğu hazneye aktararak pistonu hareket ettirir pistonun ileri yönlü hareketini sağlamış olur sıvı basıncının azaltılması ile oluşan basınç farkına dayalı olarak piston geri yönlü hareket eder.

Deneylede kullanılan aktüatör Besmak marka ve maksimum 150 tona kadar yük dinamik yük uygulayabilmektedir.



Şekil 3.8. Deneylede kullanılan hidrolik dinamik aktüatörün şekli

#### 3.2.2. Deformasyon ölçme cihazı

##### Doğrusal Değişken Diferansiyel Çeviricisi (LVDT)

Titreşimi algılamak, gerilme testi yapmak, aktüatör hareketini ölçmek ve doğrusal hareketi elektrik sinyaline dönüştürmek için kullanılan ölçüm cihazlarıdır. LVDT içi boş bir silindirik bobin dizisinden oluşur.

Birincil bobindeki alternatif bir manyetik alan, 2. bobindeki manyetik alanı indükler; 2. bobindeki indüklenen manyetik alan ise içi boş tüpün merkezinden geçen çekirdeğin konumuna bağlıdır. Çekirdek herhangi bir yöne hareket ettirildiğinde çıkış sinyalinin artmasına neden olur.

Dijital ve analog olmak üzere bir çeşidi vardır. Şekil 3.9.'da deneylerde kullanılan LVDT gösterilmiştir.

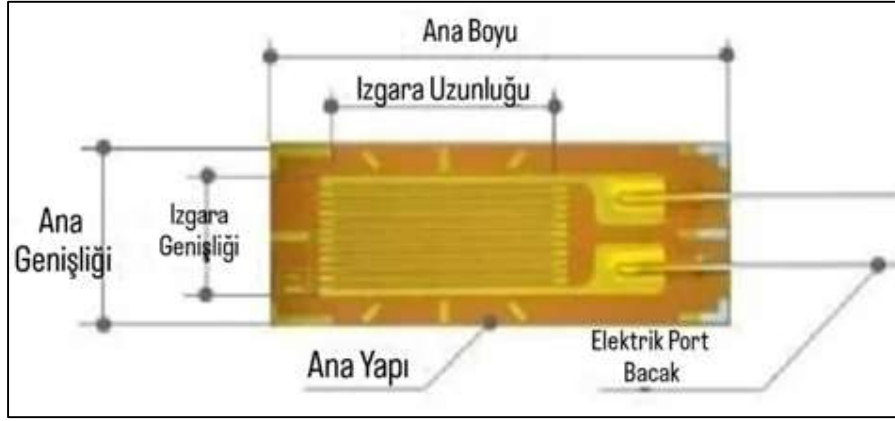


Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan LVDT'ler

#### Strain Gauge (Şekil Değişirme Ölçer)

Deneylerde kullanılan malzemelerin yüzeylerinde oluşan birim şekil değiştirmeyi ölçmek için kullanılan sensörlerdir. İnce kesitli iletken telin ince şerit üzerine tekrarlı sarılarak yerleştirilmesiyle oluşur. Deneylerde kullanılan şekil değişirme ölçer yaprak tipi şekil değişirme ölçerlerdir. Bu tip şekil değişirme ölçerlerin ince yapısından dolayı metal yüzeye yerleştirilmesi çok kolay değildir. Öncelikle metal yüzeyin temizlik işlemi yapılmalı temizlik işlerin bittikten sonra alkol veya kolonya gibi temizleyici sıvılar yardımı ile tozlar yüzeyden atılmalıdır. Sonrasında yerleştirilecek alana sıvı yapıştırıcılar yardımı ile sabitlenmelidir.

Hesaplamalarda ana mantık yapıştırılan yüzeyin uzama esnasında şekil değişirme ölçer telin boyu uzayarak kesiti incelir kesiti incelen tellerde direnç artacak mantığı ile uygulanan kuvvete bağlı olarak iletken direncinde artma veya azalma meydana gelecektir. Kesitteki direncin değişmesi şekil değişirme ölçer üzerinden geçen akımın voltajını değiştirir bu voltaj değişikliği yapıştırılan bölgedeki şekil değişimini ölçmüş olur. Daha sonra elastisite teorisinde kullanılan denklemlerin yardımıyla  $\sigma = E \epsilon$  formülü kullanılarak ölçülen şekil değiştirmeyi sayısal veriye dönüştürür. Deneylerde Şekil 3.10.'da gösterilen FLAB-5-11-3LJC-F modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Deneyde kullanılan yaprak tipi gerinim ölçer (Published 2017)

#### 3.2.3. Veri toplama ve kaydetme sistemi (Data logger)

Data logger elektriksel bir veri kaydedicidir. Verileri zamana veya başka bir sinyal voltajına karşı çizilen sinyal voltajlarını ölçmek ve görüntülemek için kayıt yapan bir elektronik bir cihazdır. Data loggerlar elektrik kaynağının olmadığı yerlerde batarya ile de çalışabilirler daha öncesinde belirlenen ölçüm aralıklarda gelen verileri kaydederler. Bu aralıklar ister milisaniye ister saat olsun ayarlanabilir. Data loggerlar bilgisayara ve gerekli ölçüm aletine bağlandıktan sonra bir arayüz sayesinde ölçüm aletlerinden gelen verileri bilgisayara kaydedebilir. Data loggerlar hem taşınabilir hem de sabit olarak kullanılabilen modelleri mevcuttur. Data loggerlar genellikle konum, yük, sıcaklık, nem, ph gibi değerleri kullanım şekline göre istenirse birçok fiziksel veriyide eş zamanlı olarak ölçebilir. Kullanımı deney başladığında ara yüzünde kayıt başla talimatı verilerek ölçüm aletlerindeki verileri datalogger'a aktarıp deney bittikten sonra da kaydedilir. Şekil 3.11.'de deneylerde kullanılan data logger sistemi gösterilmiştir.

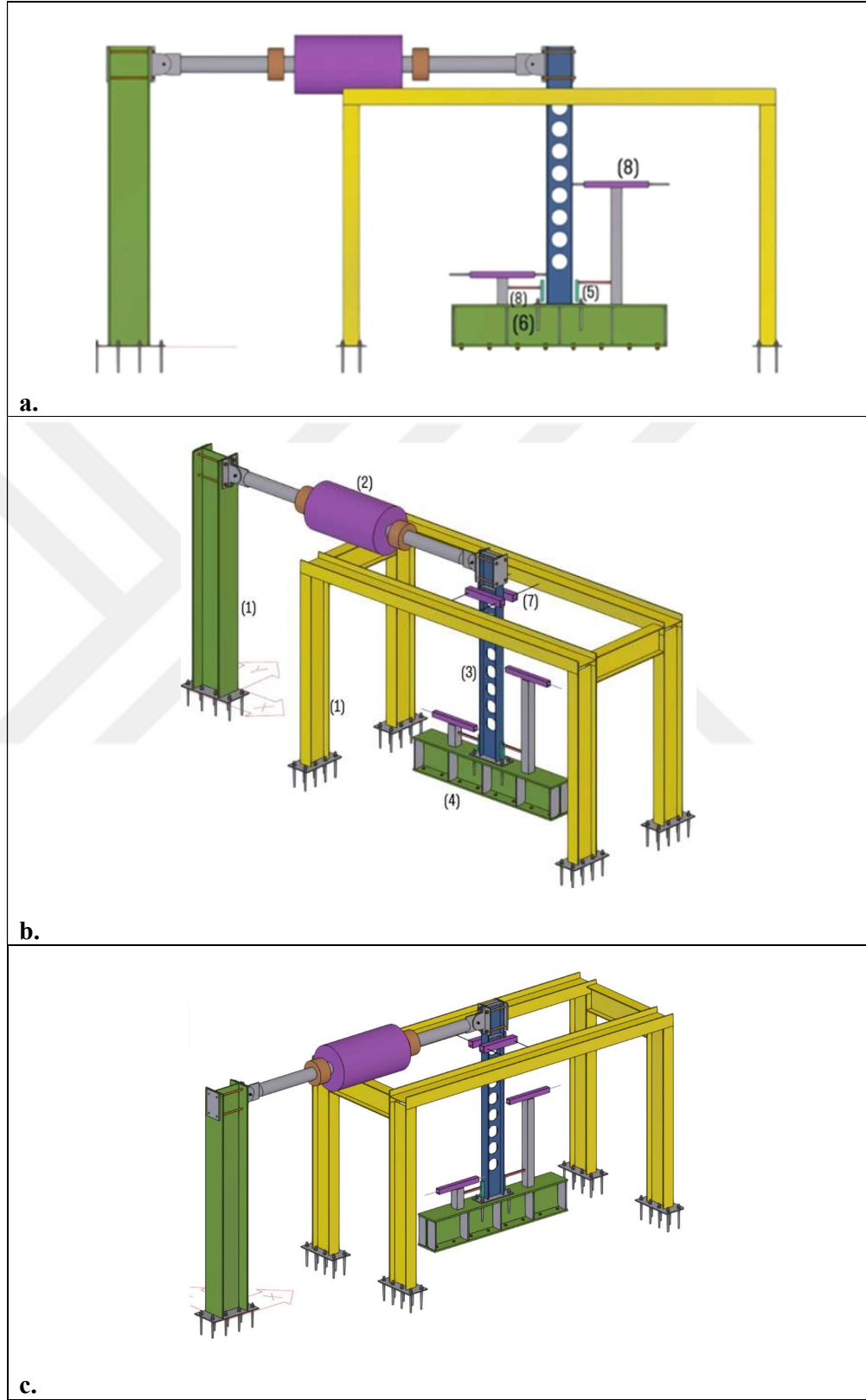


**Şekil 3.11.** Deneylerimizin yapım aşamasında kullanılan data logger

### 3.3. Deney Düzeneği

Deneylerimiz Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinde bulunan İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılmıştır.

Deney düzeneği yapı Şekil 3.12. ve Çizelge 3.2.'de gösterildi gibi laboratuvardaki çelik, kiriş ve kolonlardan oluşan çelik çerçeve sistem, bu sisteme yerleştirilmiş hidrolik dinmaik aktüatör, kirişin üst noktalarından her iki tarafına istenmeyen eksenel kaymaları engellenmesi için burkulma çubukları ve zemine ankraj çubuklarla sabitlenmiş rijit kolondan oluşmaktadır. Rijit kolon kullanılmasının sebebi tezin amacının sadece petek kirişlerin davranışını incelenmesi aynı zamanda deney sırasında herhangi istenmeyen herhangi bir eksenel kaymayı engellemektir.



Şekil 3.12. Deneylerin yapıldığı sistem ve numune yerleşim modeli (a) önden görünüşü; (b) sağ önden görünüşü; (c) sol önden görünüşü.

**Çizelge 3.2.** Deneyleerin yapıldığı sistemin elemanları

Numara	Eleman Adı
1	Çerçeve sistem
2	Hidrolik Aktüatör
3	Deney Numunesi (Kiriş)
4	Rijit Kolon
5	Kiriş Uç Plakası
6	Bulonlar
7	Burkulma Çubukları
8	Liner Değişken Diferansiyel Transformatörü (LVDT)

#### 3.4. Döngüsel Yükleme ve Yükleme Protokolleri

Yapılardaki birleşimlerin deneysel olarak modellenmesi ve incelenmesi için deprem etkisinin kolon-kiriş birleşim noktalarına ve yapı elemanlarına etkisini deney ortamında deprem yüklemesinin sebep olduğu etkileri daha gerçekçi bir şekilde aktarılması gerekmektedir. Bu maksatla yükleme protokolleri oluşturulurken depremlerin yerküredeki hareketleri yapı konstrüksiyonunun cinsine, taşıyıcı elemanların birleşimlerinin cinsine bakılarak yüklemenin frekansına ve döngü sayısı belirlenmiştir. Her ülke farklı genlik ve frekansa sahip olduğundan her ülkenin protokolü farklıdır. Ülkelerin genelde kullandıkları protokoller aşağıda sırasıyla verilmiştir (Tavlaşoğlu 2022 );

##### 3.4.1. ATC-24 yükleme protokolü

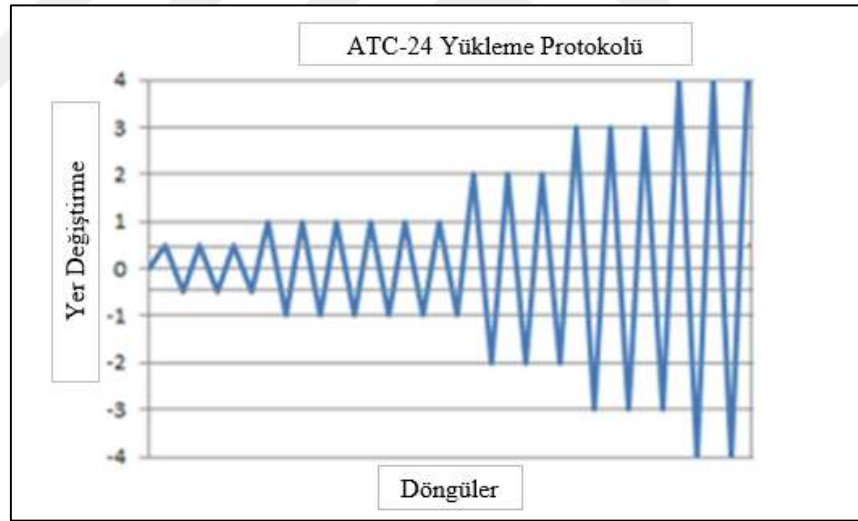
Çelik konstrüksiyon yapıların taşıyıcı eleman sistemindeki birleşenlerini deneysel ortamda incelemek için döngüsel yükleme altında elastik deformasyonlu kontrolle çalışan ilk kısa protokoldür.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

ATC-24 yükleme protokolünün maksimum deformasyon değerleri ve döngü sayıları Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** ATC-24 yükleme protokolü değerleri

Yükleme Adımı	Maksimum Deformasyon Değeri	Döngü Sayısı (n)
1	$0,5\Delta_y$	3
2	$1 \Delta_y$	6
3	$2 \Delta_y$	3
4	$3 \Delta_y$	3
5	$4 \Delta_y$	3

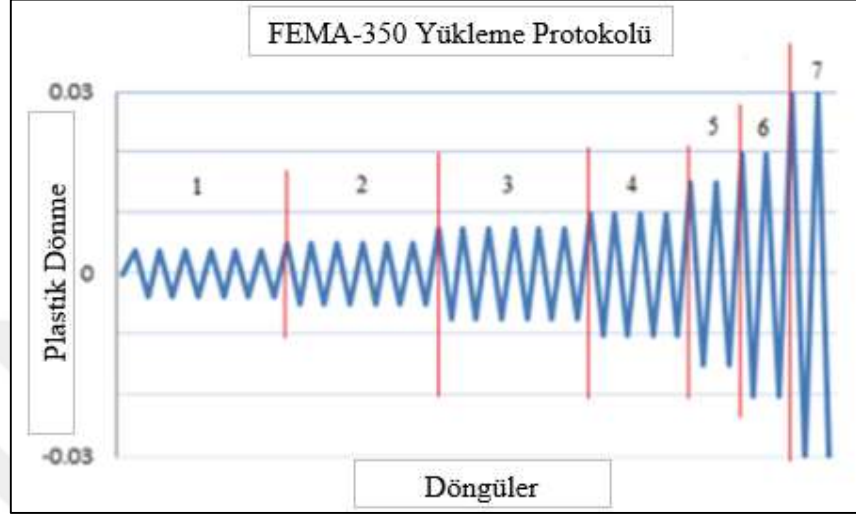


**Şekil 3.13.** Atc-24 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022)

#### 3.4.2. FEMA-350 yükleme protokolü

FEMA-350 yükleme protokolü (Şekil 1.14.) Amerikan Çelik Konstrüksiyon Enstitüsünün çelik yapı konstrüksiyonunun taşıyıcı sistem elemanlarının birleşimleri için referans aldığı protokoldür. Katlar arasındaki plastik dönmesi radyan cinsindedir. Her adımda iki döngü gerçekleşir. Hasar yüklemenin maksimum olduğu durumdaki yükün

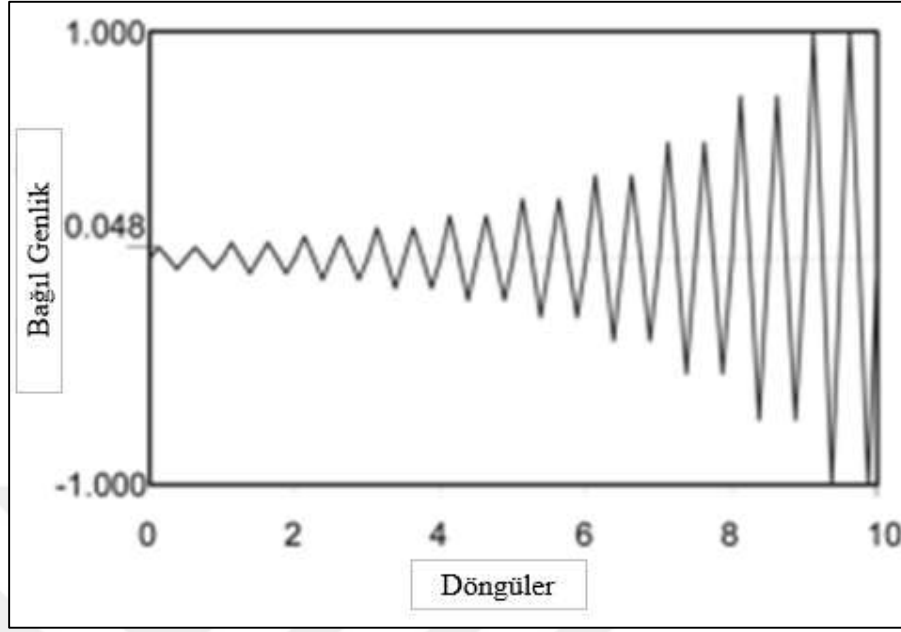
yüzde 20'sinin altına düştüğünde ve serbest halde stabilitenin belirsiz hale geldiğinde hasar meydana geldiği kabul edilir (Tavlaşoğlu 2022).



Şekil 3.14. FEMA-350 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022)

#### 3.4.3. FEMA-461 yükleme protokolü

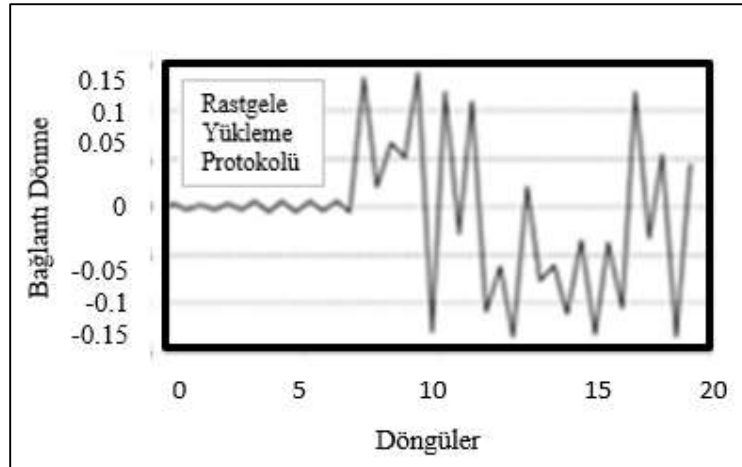
FEMA-461 yükleme protokolü (Şekil 3.15) genellikle sürüklenmeye hassas taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılır. Her bir deformasyon geldiğinde iki kere döngü oluşturulur. Yüklemede  $\Delta$  monotonik yükleme sonucu oluşan maksimum deformasyon genliğidir. yükleme başlangıcı  $a_1 = 0,048 * \Delta$  başlar. Sonunda ağır hasar durumu oluşmuşsa genlikler  $0,3\Delta_m$  şeklinde artışlar yaparak devam eder (Tavlaşoğlu 2022).



Şekil 3.15. FEMA-461 yüklem protokolü (Tavlaşoğlu 2022)

#### 3.4.4. Rastgele yüklem protokolü

Bu protokol iki yüklem yönünde rastgele genliklerle döngüsel yüklem protokolüdür (Şekil 3.16.). Bu tarz yüklemelerde genliğin sıralaması yapının davranışını değiştirir.



Şekil 3.16. Rastgele yüklem protokolü (Okazaki ve Engelhart 2007)

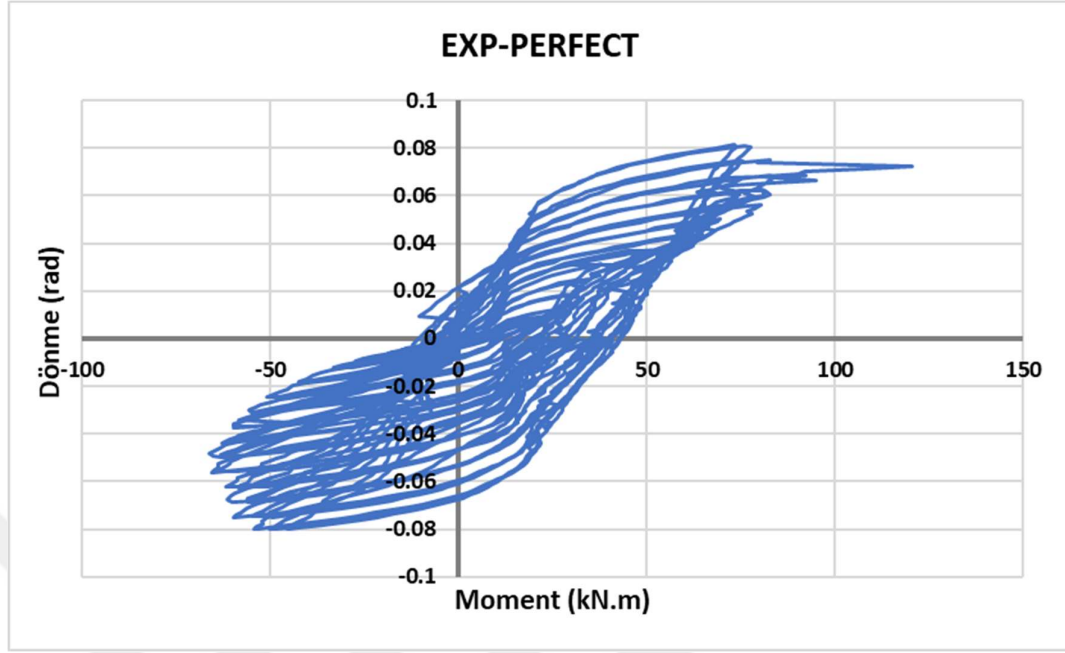
### **4. DENEY VE SONLU ELEMANLAR SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Çalışmalarda toplamda 5 adet petek kirişin tasarımı geometrik sınır şartlar sağlanarak kirişlere döngüsel yükleme uygulanarak davranışlarını belirlemek ve yukarıda bahsi geçen altın oran kavramını geometrik şartlara entegre edilerek tasarımın davranışını incelemek için deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kirişler uç noktalarından aktüatöre bağlanarak FEMA-350 protokolü uygulanmıştır. Deneyler sonucunda aktüatörden ve yukarıda bahsedilen ölçme aletlerinden alınan verilere göre numunelerin farklı delik çaplarına göre moment dayanımları, enerji yutma kapasiteleri göçme modları, dönme kapasiteleri gibi özellikler incelenip karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonlu elemanlar metodu kullanılarak (ABAQUS) analizi yapıp deneysel veriler karşılaştırması yapılmıştır.

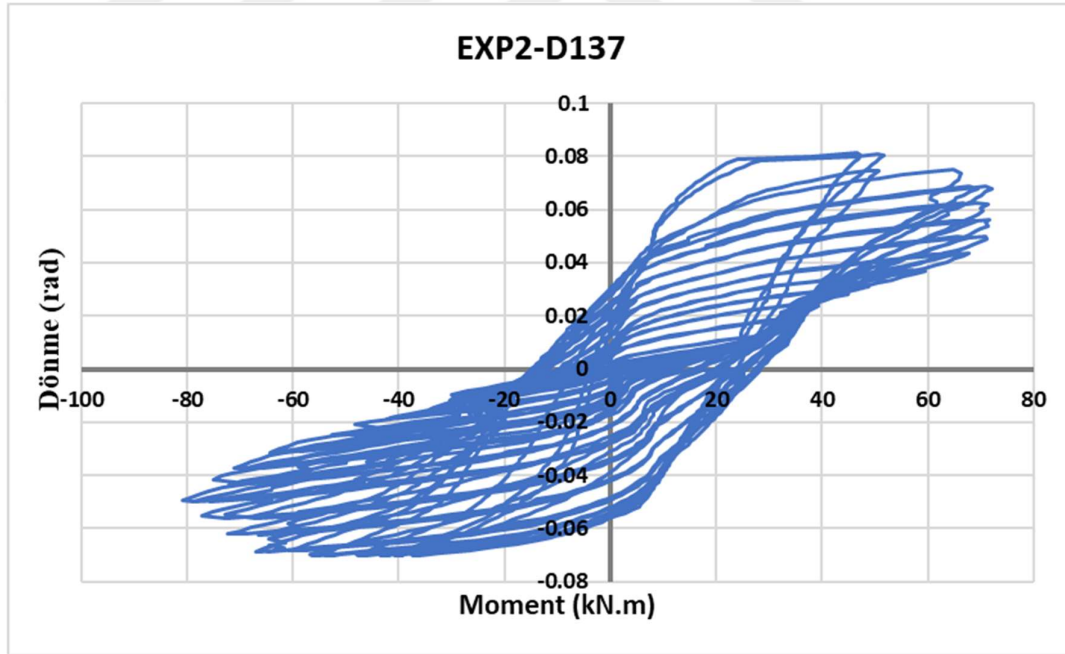
#### **4.1. Deneylerin Karşılaştırılması**

Deneylerde kullanılan numunelerin isimleri sırasıyla;

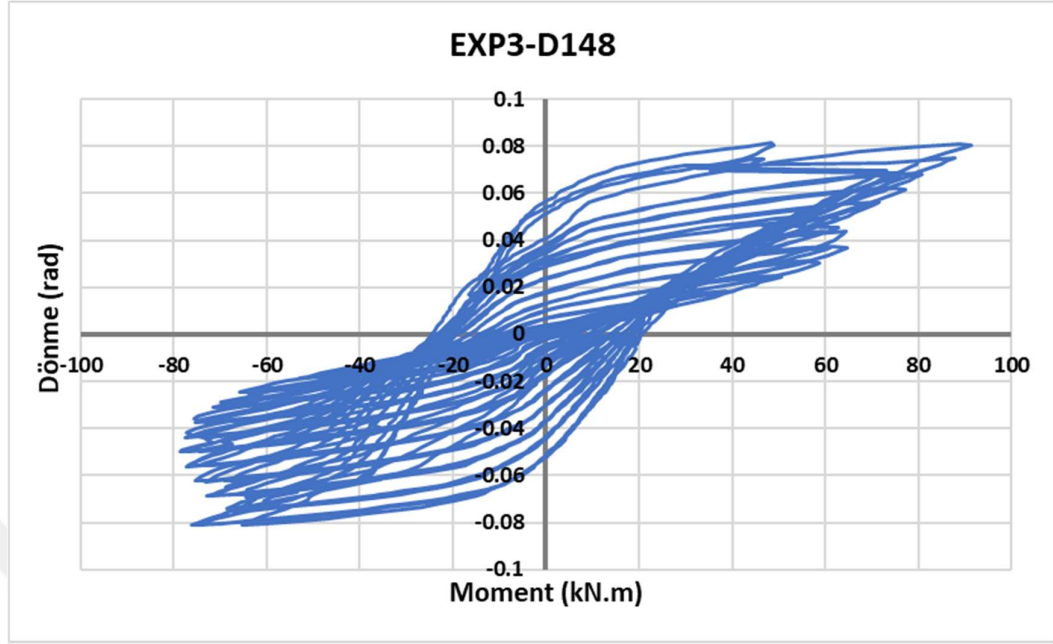
EXP-PERFECT, EXP2-D137, EXP3-D148, EXP4-D160, EXP5-D196 olmak üzere beş adettir. Tüm deneylerde IPE 240 profili kullanılmıştır ve deney boyu 1/1 ölçekli olup uzunluğu 2400mm dir. Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil4.4. ve Şekil 4.5.'de moment – dönme eğrileri verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.1. deki deney sonuçları elde edilmiştir.



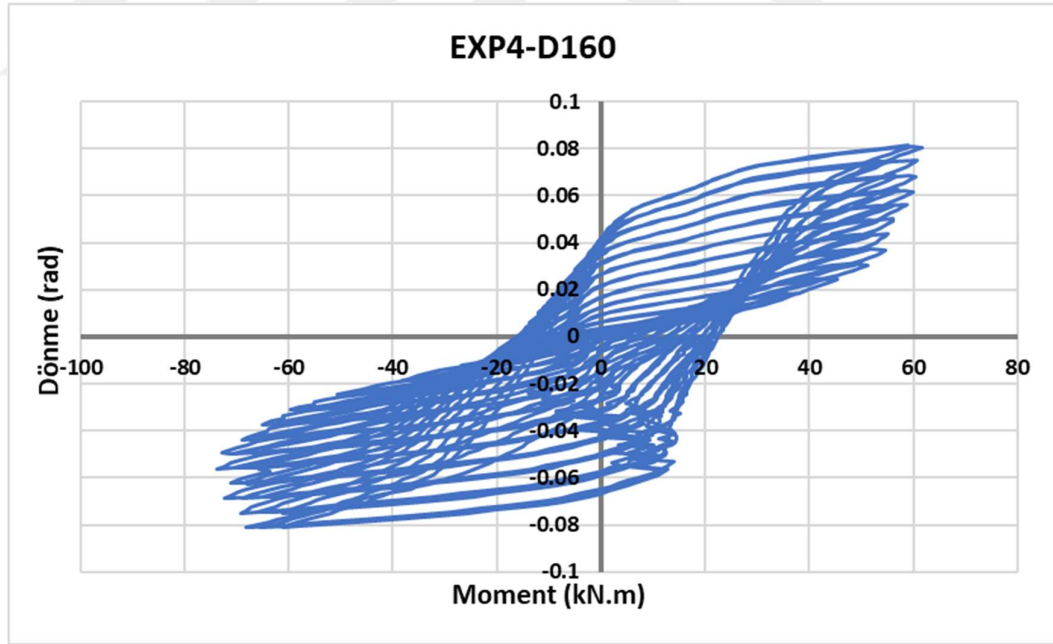
Şekil 4.1. EXP-PERFECT numunesinin moment-dönme grafiğidir



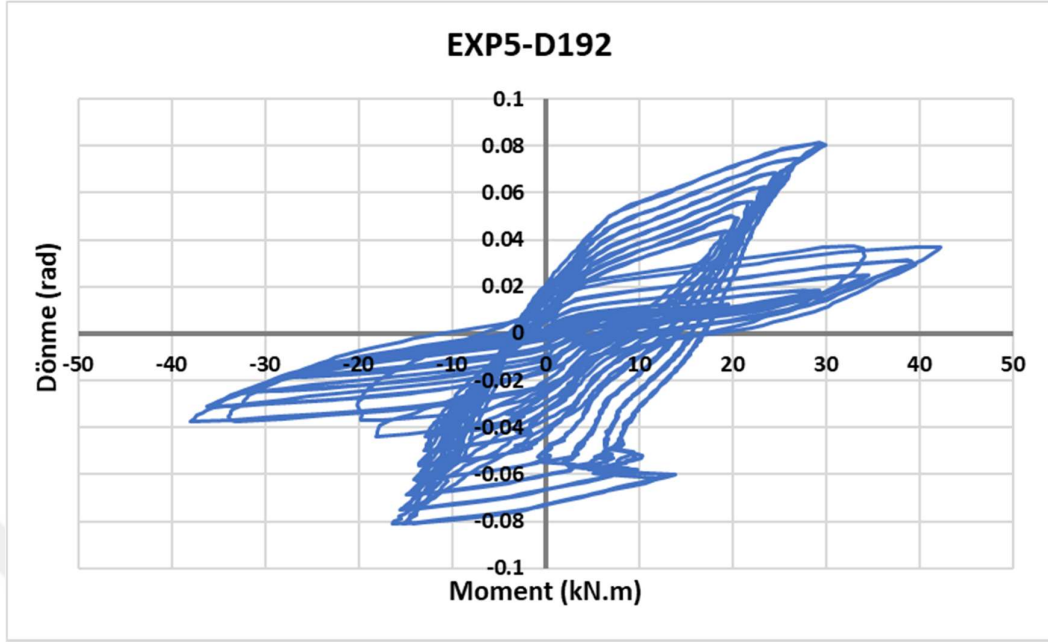
Şekil 4.2. EXP2-D137 numunesinin moment-dönme grafiğidir



Şekil 4.3. EXP2-D148 numunesinin ( $H_s/D_0=1,618$  (altın orana) göre tasarlanan numune) moment-dönme grafiğidir.



Şekil 4.4. EXP4-D160 numunesinin moment-dönme grafiğidir



Şekil 4.5. EXP5-D192 Numunesinin Moment-Dönme grafiğidir

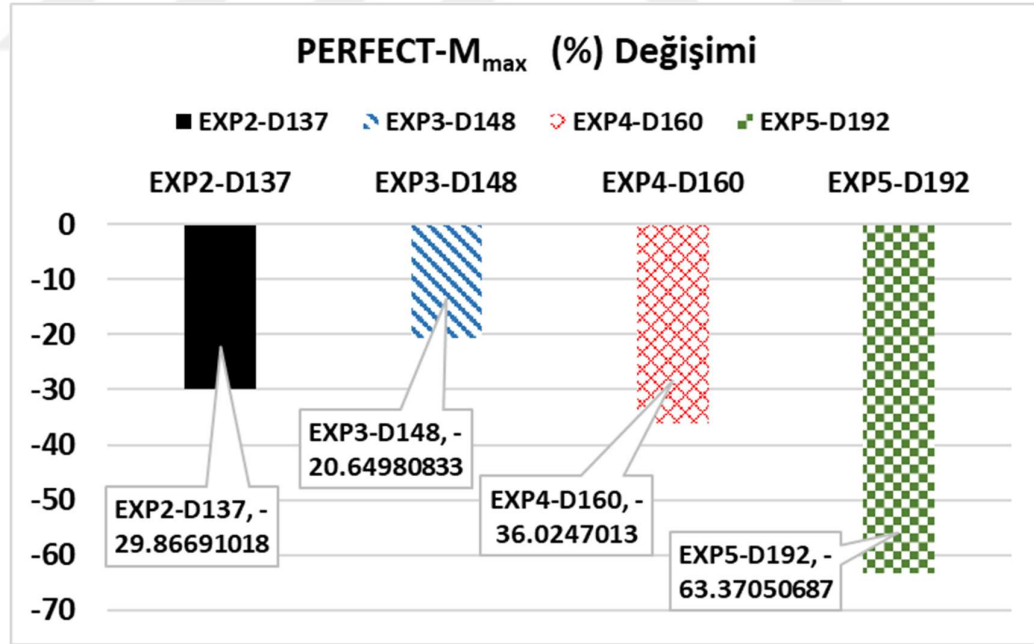
Şekil 4.2.'de EXP2-D137 numunesinin moment-dönme grafiğidir,  $H_s/D_0 < 1,75$  için ( $D_0=240/1,75 \Rightarrow D_0=137,14$  mm) IPE 240 profiline göre uyarlandığında kirişte 137 mm çapında 8 adet delik açılmıştır. Şekil 4.3.'de EXP3-D148 numunesinin moment-dönme grafiğidir.  $H_s/D_0$  bağıntısını altın orana (1,618) göre delik çapları 148 mm olan 8 delik adet açılmıştır. Şekil 4.4. EXP4-D160 numunesinin moment-dönme grafiğidir.  $1,25 < H_s/D_0 < 1,75$  sınır şartların orta değeri olan 1,5'e eşitlenmiştir ve delik çapı 160mm olan 8 adet delik açılmıştır. Şekil 4.5. EXP 5-D192 numunesinin moment-dönme grafiğidir.  $1,25 < H_s/D_0 < 1,75$  alt sınıra değerine göre çapları 192 mm olan 8 tane dairesel delik açılmıştır. Ayrıca Çizelge 4.1. de deney sonuçları verilmiştir.

Deney sonuçları EXP-PERFECT numunesine göre karşılaştırılmıştır. Geometrik sınır şartlara uyularak kirişler üzerinde açılan dairesel boşlukların çapları arttıkça maksimum moment ve maksimum kuvvet değerleri Çizelge 4.1. verilmiştir.

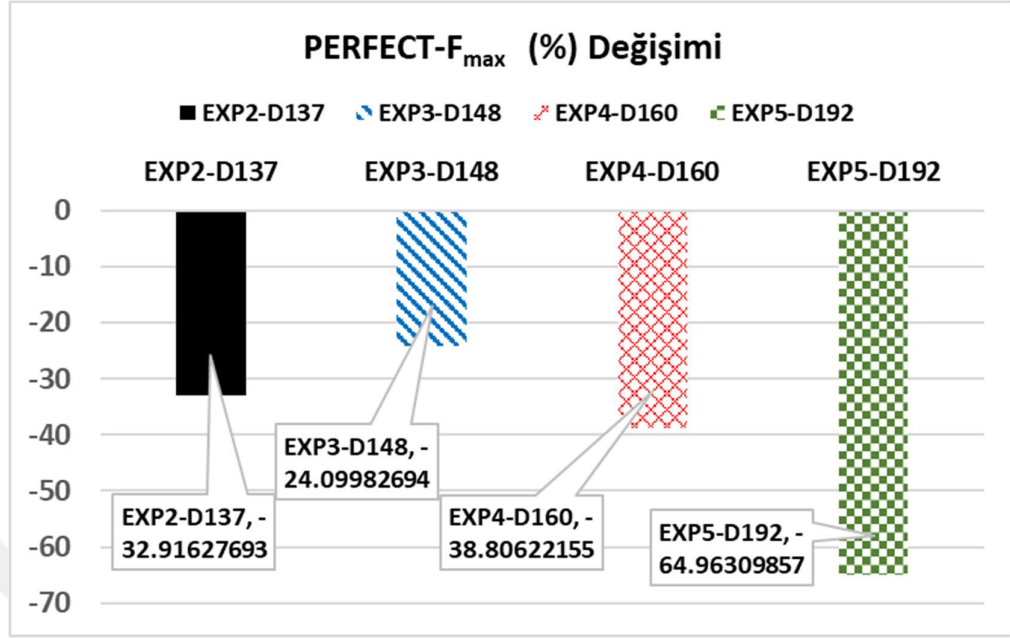
#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

**Çizelge 4.1.** Kontrol numunesine göre  $M_{max}$  değişimi (%) ve  $F_{max}$  değişimi (%)

NUMUNELER	$M_{max}$ (kN.m)	$F_{max}$ (kN)	PERFECT- $M_{max}$ Değişimi	PERFECT- $F_{max}$ Değişimi
EXP-PERFECT	115,20	52,36	0	0
EXP2-D137	80,79	35,12	-29,87	-32,92
EXP3-D148	91,41	39,74	-20,65	-24,10
EXP4-D160	73,69	32,04	-36,02	-38,81
EXP5-D192	42,19	18,34	-63,37	-64,96



**Şekil 4.6.** Kontrol numunesine göre maksimum moment ( $M_{max}$ ) değişimi (%)



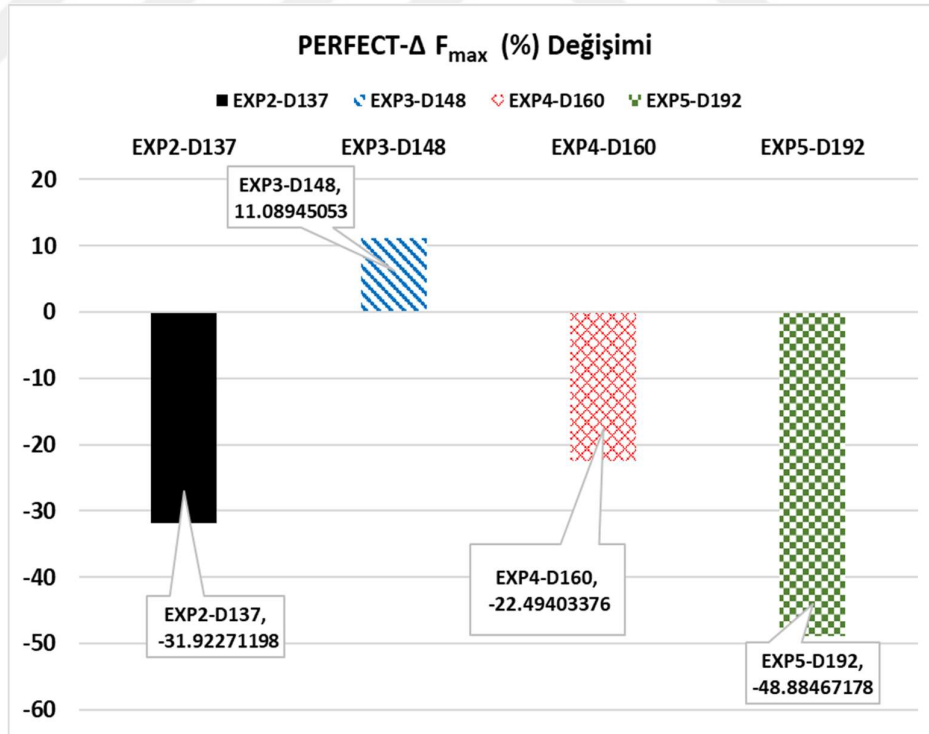
Şekil 4.7. Kontrol numunesine göre  $F_{max}$  değişimi (%)

EXP-PERCET numunesini delik çapları artacak şekilde diğer numunelerle karşılaştırıldığında genel olarak maksimum moment ve maksimum kuvveti azalmaktadır (Şekil 4.6.), (Şekil 4.7.). Fakat EXP2-D137 ile EXP3-D148 numuneleri karşılaştırıldığında delik çapı 148 mm olan EXP3-D148 numunesi yani geometrik sınır ( $H_s/D_0 = \mathbf{1,618}$  (**ALTIN ORAN**)) şartı altın orana göre tasarlanan dairesel boşluklu petek kirişin maksimum moment ve maksimum kuvveti delik çapı 137 mm olan EXP2-D137 numunesine göre daha fazladır (Çizelge 4.1.). Sonuç olarak Şekil 4.6., Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi delik çapı arttıkça maksimum moment ve maksimum yük azalmaktadır. Ayrıca delik çaplarını kıyasladığımızda tasarımımızda altın oran kullanıldığında (EXP3-D148) Maksimum moment ve maksimum yük EXP2-D137 numunesine göre artış göstermiştir. Sonuç olarak altın oranlı delik çapına sahip numune kendinden küçük delik çapına sahip numuneye göre maksimum moment ve maksimum yük kapasitesinin daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

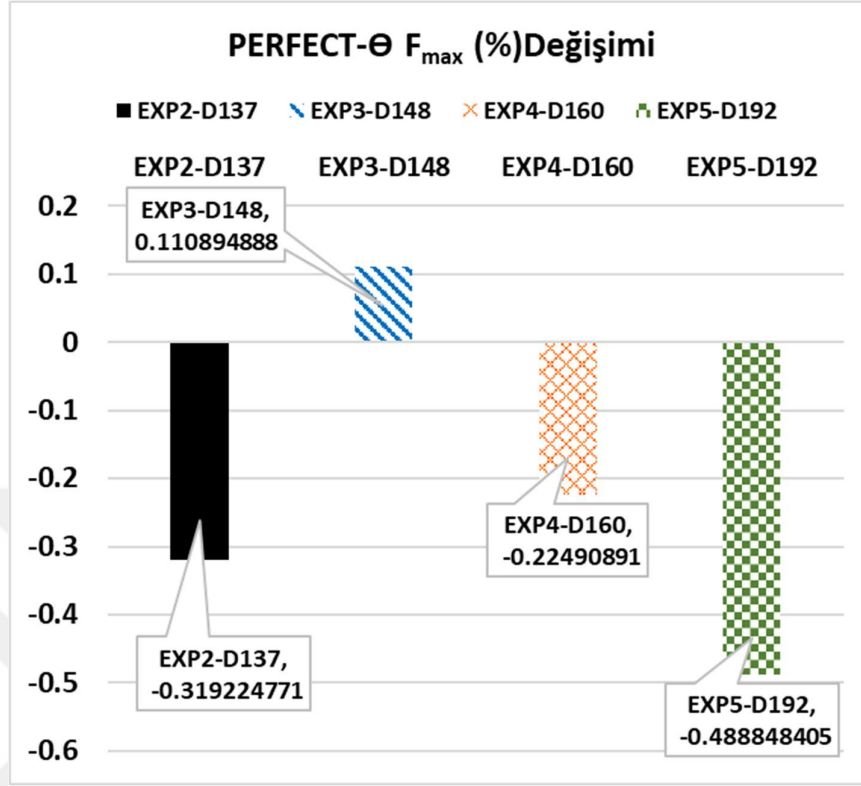
#### 4. DENEY VE SONLU ELEMENLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

**Çizelge 4.2.** Kontrol numunesine göre  $\Delta F_{\max}$  değişimi (%)  $\Theta F_{\max}$  değişimi (%)

NUMUNELER	$\Delta F_{\max}$ (mm)	$\Theta F_{\max}$ (rad)	PERFECT- $\Delta F_{\max}$ Değişimi (%)	PERFECT- $\Theta F_{\max}$ Değişimi (%)
EXP-PERFECT	173,90	0,072	0	0
EXP2-D137	118,38	0,049	-31,92	-0,32
EXP3-D148	193,18	0,080	11,09	0,11
EXP4-D160	134,78	0,056	-22,49	-0,22
EXP5-D192	88,89	0,037	-48,88	-0,49



**Şekil 4.8.** Kontrol numunesine göre  $\Delta F_{\max}$  değişimi (%)



Şekil 4.9. Kontrol numunesine göre  $\Theta F_{max}$  değişimi (%)

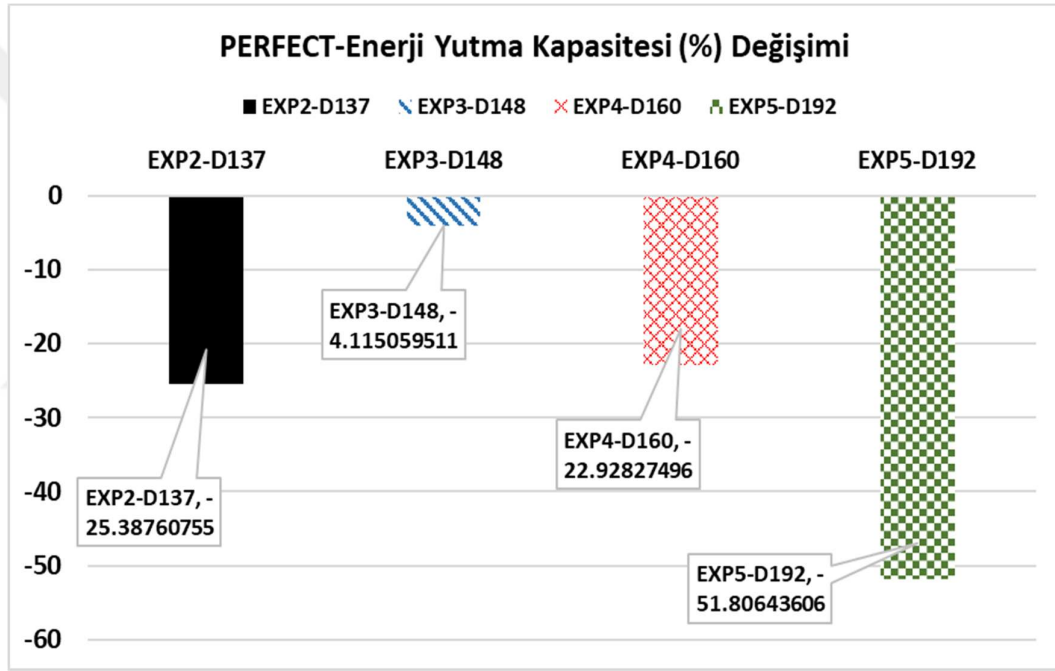
Çizelge 4.2., Şekil 4.8.ve Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi EXP-PERFECT numunesinin diğer numunelerle kıyaslandığında maksimum yer değiştirme değeri ( $\Delta F_{max}$ ) ve maksimum dönme değeri ( $\Theta F_{max}$ ) altın oran ile tasarlanan EXP3-D148 numunesi %11,09 oranında artış gösterirken diğer numuneler azalma göstermiştir.

Çizelge 4.3. Kontrol numunesine göre enerji yutma kapasitesi değişimi (%)

NUMUNELER	Enerji Yutma Kapasitesi (kN.m.rad)	PERFECT-Enerji Yutma Kapasitesi Değişimi (%)
EXP-PERFECT	10,39	0
EXP2-D137	7,75	-25,39
EXP3-D148	9,96	-4,12
EXP4-D160	8,01	-22,93
EXP5-D192	5,01	-51,81

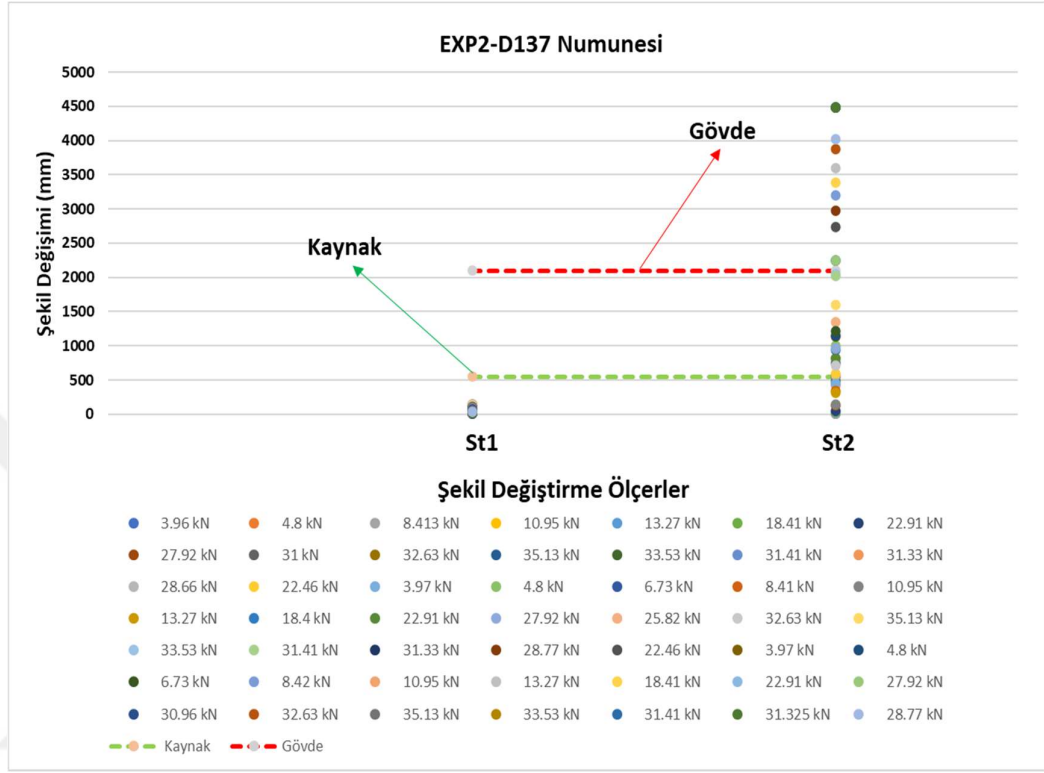
#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Enerji yutma kapasitesi, deneyde uygulanan dögüsel yükleme sırasında oluşan dönme-moment histerezis dögüsünün alanlarının toplamıdır (Guo 2023). Çizelge 4.3. ve Şekil 4.10.'de gösterildiği gibi EXP-PERFECT numunesinin enerji yutma kapasitesi diğer numunelerle kıyaslandığında altın oran ile tasarlanan EXP3-D148 numunesi %4,1151 gibi küçük bir oranda azalma göstermişken diğer numuneler EXP-PERFECT numunesine en yakın %22,93 oranından daha az enerji yutmuştur. Sonuç olarak delik çapı arttıkça enerji yutma kapasitesi azalmaktadır ama altın oran kullanılarak tasarlanan model perfect modele daha yaklaşık değer vermiştir.



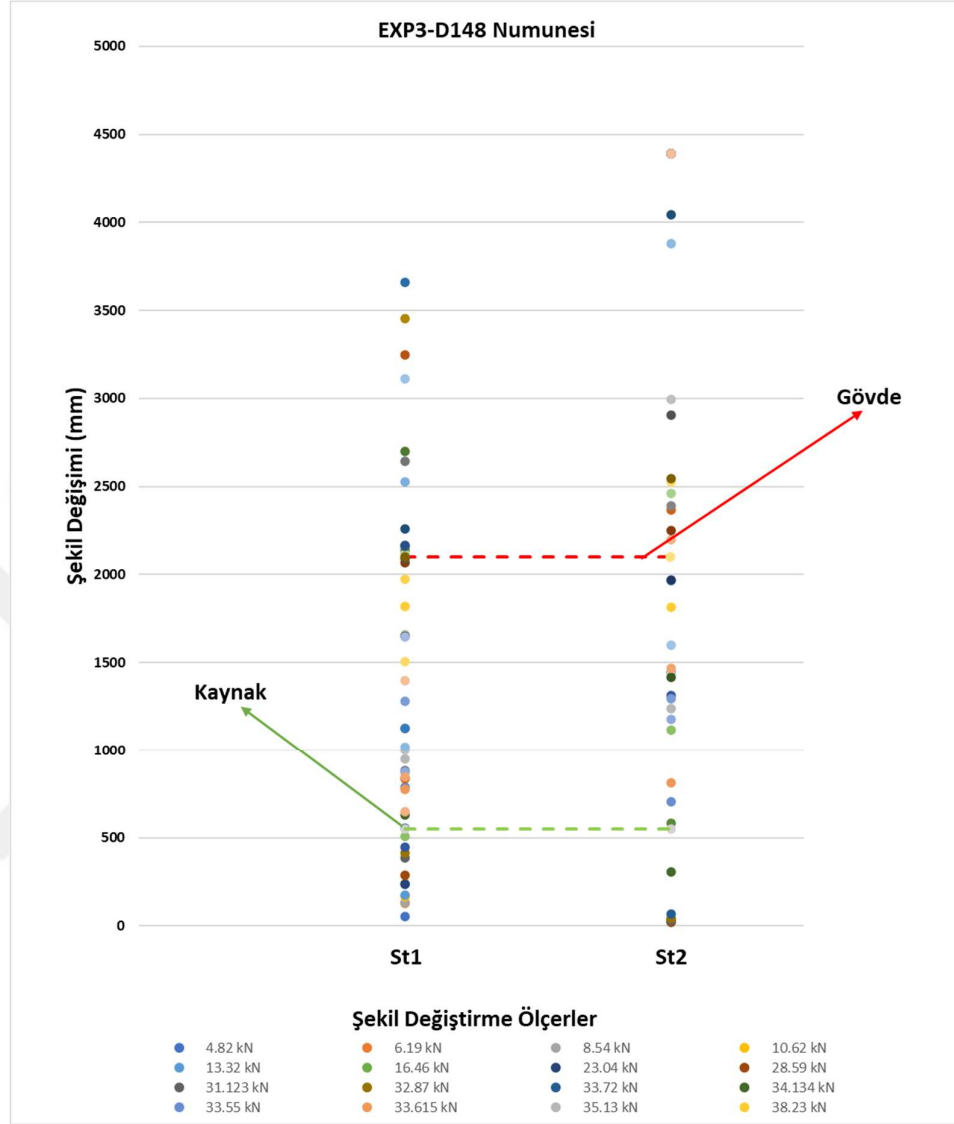
Şekil 4.10. Kontrol numunesine göre enerji yutma kapasitesi değişimi (%)

4.1.1. Deformasyon değerleri



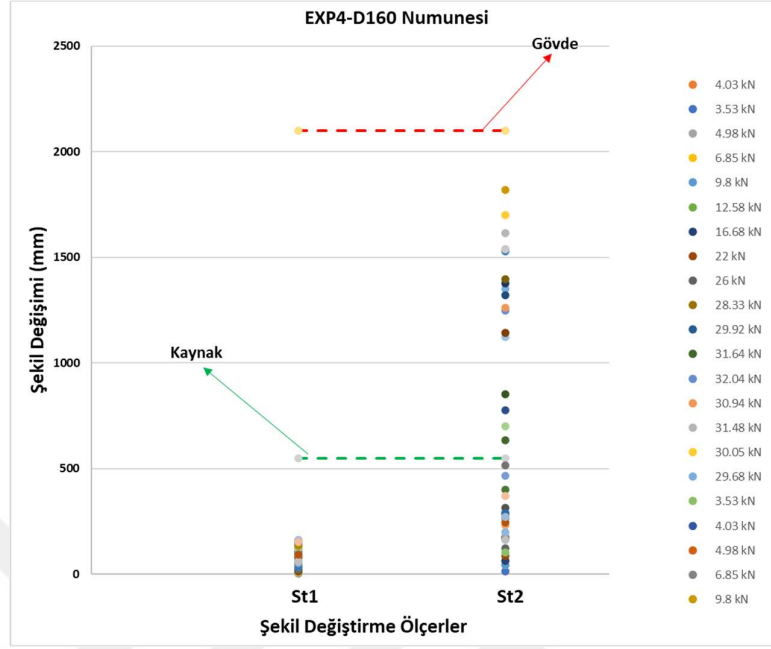
Şekil 4.11. EXP2-D137 Şekil değişimi-Yük grafiği (EXP2-D137 numunesinin kaynağında bulunan St1 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği ve gövde de bulunan St2 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği şekil değişimi.).

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

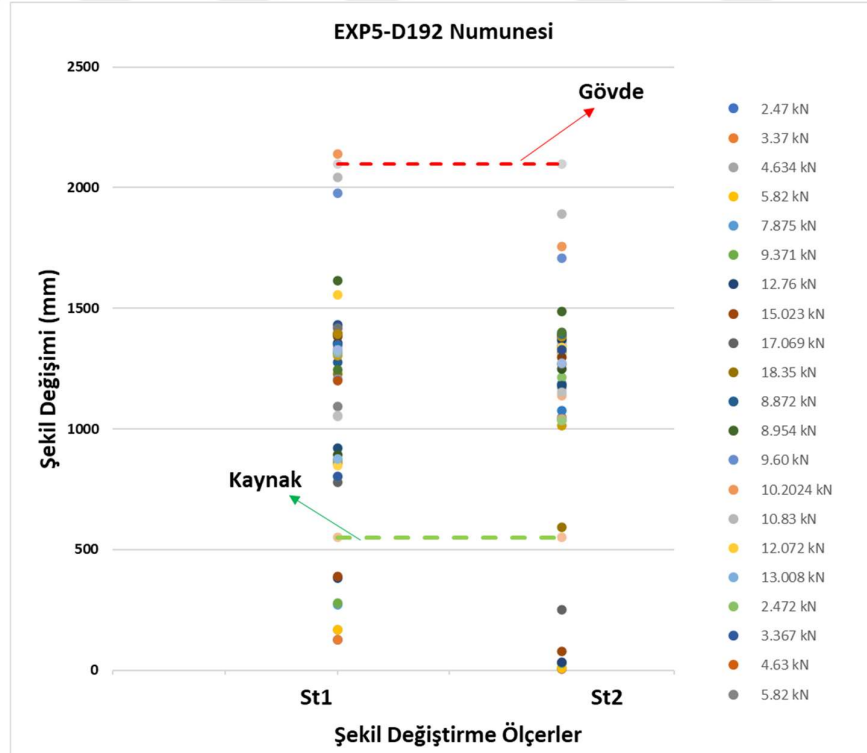


**Şekil 4.12.** EXP3-D148 Şekil değişimi-Yük grafiği (EXP3-D148  $H_s/D_0=1,618$  (altın orana) göre tasarlanan numunenin kaynağında bulunan St1 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği ve gövde de bulunan St2 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği şekil değişimi.).

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 4.13. EXP4-D160 Şekil değişimi-Yük grafiği (EXP4-D160 numunesinin kaynağında bulunan St1 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği ve gövde de bulunan St2 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği şekil değişimi.).



Şekil 4.14. EXP5-D192 Şekil değişimi-Yük grafiği (EXP5-D192 numunesinin kaynağında bulunan St1 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği ve gövde de bulunan St2 şekil değiştirme ölçerinin gösterdiği şekil değişimi.).

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi EXP2-D137 numunesinin kolon kiriş birleşimindeki kaynak bölgesine konulan şekil değiştirme ölçerin gösterdiği değerlere göre kaynak bölgesinde herhangi bir akma olmadığı görülmüştür. Kolon kiriş birleşim noktasından 1.200 mm yüksekliğine konulan şekil değiştirme ölçerin verdiği değerlere göre 42. Döngüde plastik bölgeye geçmeye başlamıştır. Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi EXP3-D148 numunesinin kolon kiriş birleşimindeki kaynak bölgesine konulan kaynak konulan şekil değiştirme ölçerin gösterdiği değerlere göre kaynak bölgesinde 45. döngüde plastik bölgeye geçmeye başlamıştır. Kolon kiriş birleşim noktasından 1.200 mm yüksekliğe konulan şekil değiştirme ölçerin verdiği değerlere göre 25. plastik bölgeye geçmeye başlamıştır. Şekil 4.13.'de görüldüğü gibi EXP4-D160 numunesinin kolon kiriş birleşim bölgesindeki kaynağa konulan şekil değiştirme ölçerin gösterdiği değerlere göre kaynak bölgesinde herhangi bir deformasyon olmadığı görülmüştür. Kiriş kolon birleşim noktasından 300mm yüksekliğe konulan şekil değiştirme ölçerin gösterdiği değerlere göre deformasyon olmadığı görülmüştür. Şekil 4.14.'de görüldüğü gibi EXP5-D192 numunesinin kaynak bölgesine konulan gerilim ölçerin gösterdiği değerlere göre kaynak bölgesinde 9. döngüde plastik bölgeye geçmeye başlamıştır. Kiriş kolon birleşim noktasından 300mm yüksekliğe konulan şekil değiştirme ölçerin verdiği değerlere göre döngüde deformasyon gözlemlenmemiştir.

**Çizelge 4.4.** Deformasyon değerleri

NUMUNELER	Kirişin Gövdesinde Bulunan Gerilim Ölçer		Kaynakta Bulunan Gerilim Ölçer	
	Plastik Deformasyona Başladığı Döngü	Plastik Deformasyona Başladığı Yük (kN)	Plastik Deformasyona Başladığı Döngü	Plastik Deformasyona Başladığı Yük (kN)
EXP2-D137	42.	27,92	-	-
EXP3-D148	25.	28,59	45.	33,72
EXP4-D160	-	-	-	-
EXP5-D192	-	-	9.	17,07

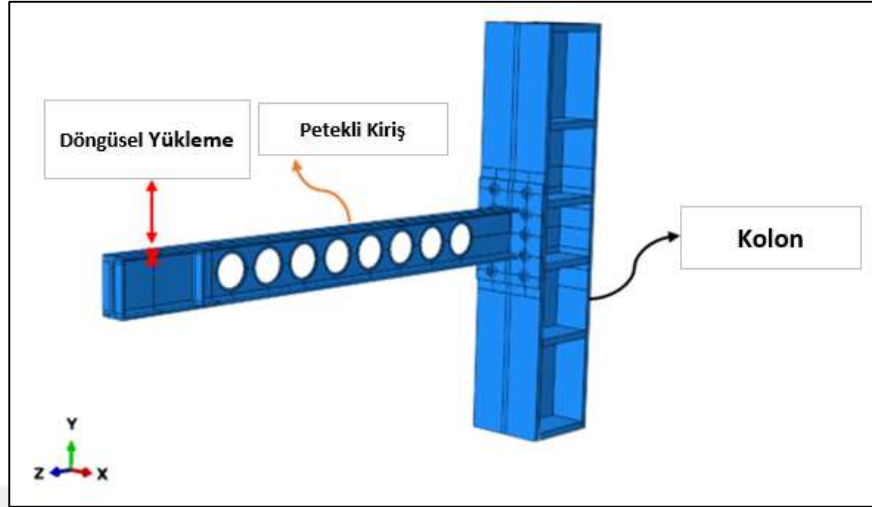
Sonuç olarak Çizelge 4.4.'e bakıldığında kaynak bölgesinde bulunan şekil değiştirme ölçerlerin altın orana göre tasarlanan kirişin, daha büyük çaplara sahip kirişlere göre daha büyük yüklere ulaşıncaya plastik bölgeye geçmeye başladığını göstermiştir. Gövdeye konulan şekil değiştirme ölçerler altın orana göre tasarlanmış kirişin kendinden daha küçük delik çapına sahip kirişten daha büyük yüke ulaşıncaya plastik bölgeye geçmeye başladığını göstermiştir.

#### **4.2. Sonlu Eleman Sayısal Model Yöntemi**

Hesaplaması ve tasarımı yapılan 5 adet 1/1 ölçekli dairesel boşluklu kirişlerin döngüsel yük altındaki davranışını FEMA-350 yükleme protokolü için sonlu elemanlar analiz ve ABAQUS programı kullanıldı. ABAQUS'da üç boyutlu sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modellerinin detayları aşağıda sunulmuştur.

##### **4.2.1. Sonlu elemanlar modeli**

Deney yapılırken deney için yaptığımız sınırlamaları dikkate alarak petek kirişlerin analizi için oluşturduğumuz numunelerin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ABAQUS (6.10) programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4.15.). ABAQUS ortamında oluşturulan modellerin geometrik yapısı ve malzeme özellikleri deney sırasında kullanılan numunelerle aynıdır. Modelleme de üç düğümlü sayısal olarak tanımlanmış kafes eleman ve uzunlamasına ve enine çubukları modellemek için T3D2 eleman tipi kullanılmıştır. Modeldeki diğer elemanları gerçeğe daha yakın değerler almak için C3D8R eleman tipi literatür ışığında seçilmiştir (Guo 2023).



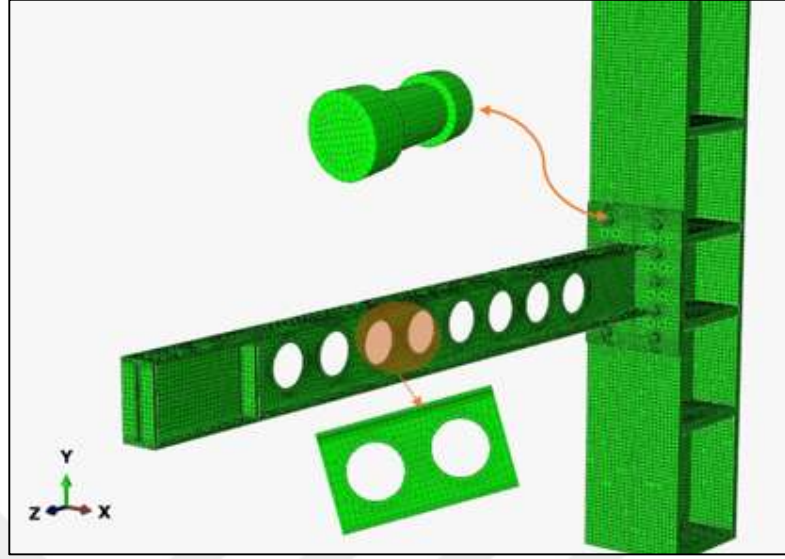
Şekil 4.15. Dijitalleştirilmiş deney modeli

Şekil 4.16.'de modellenen her birleşenin parçaya özel ağ yapısı analizin gerçeğe daha yakın değerler verebilmesi ve analiz süreleri göz önüne alınarak modellenen kirişlerin, kolonların, berkitme levhalarının, kolon berkitmelerinin ağ boyutları 15 mm alın levhası ağ boyutları 10 mm ve bulonların ağ boyutları 3 mm olarak alınmıştır. Bütün birleşenlerde “Structured” tekniği kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur (Guo 2023).

Modele mesh üretirken, yakınsamanın yüksek olabilmesi ve analizin doğru sonuç verebilmesi için ek olarak aşağıdaki hususlar dikkate alınması gerekmektedir;

1. Meshlemenin üniform dağılımı.
2. Eğrisel Yüzeylerde eleman seçimine dikkat edilmesi.
3. Yapının durumuna göre simetriden yararlanılması.

(Jacobian 2015)



Şekil 4.16. FEM elemanların ağ halleri

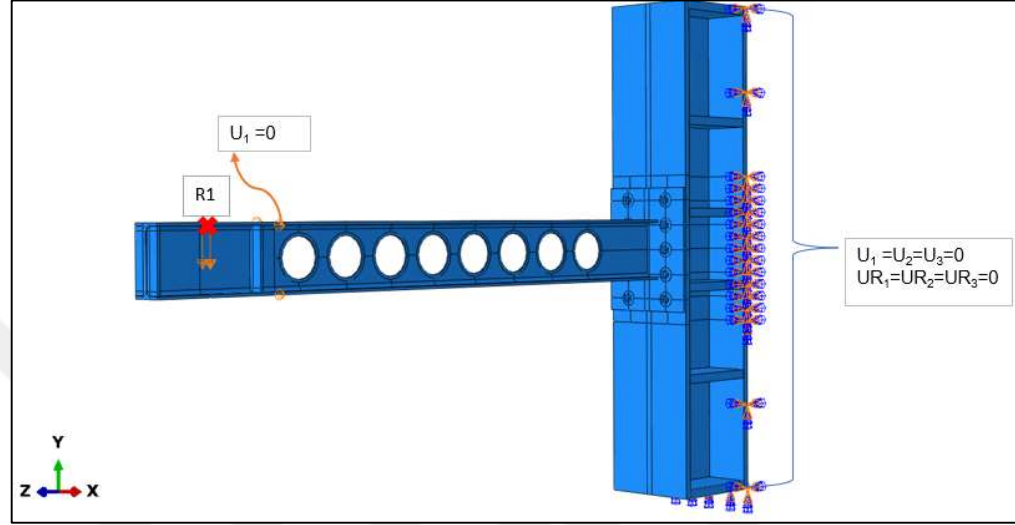
Deney bileşenleri iki farklı bağlantı yöntemi kullanılarak birleştirilmek suretiyle bütün model oluşturuldu. I kesitli petek kirişler (deliksiz olanda dahil) “Kaynak” bağlantısıyla alın levhasına bağlanmıştır. Kaynak bağlantısıyla bağlanan diğer bileşenler kolonlar ile kolon berkitmeleri ve kiriş ile kiriş berkitmeleridir. Bulonların kolon ve alın levhaları arasında sadece kaynak bulunmaktadır. Bunun içinde temas yaklaşımı (Contact), normal eksen yönünde teması model üzerinde etki ettirmek için teğet yönde “penalty” (Hata) fonksiyonu kullanılmıştır. Temas yaklaşımı için sürtünme katsayısı 0,2 olarak alınmıştır (Guo 2023).

#### 4.2.2 Sınır koşulları ve yük yükleme

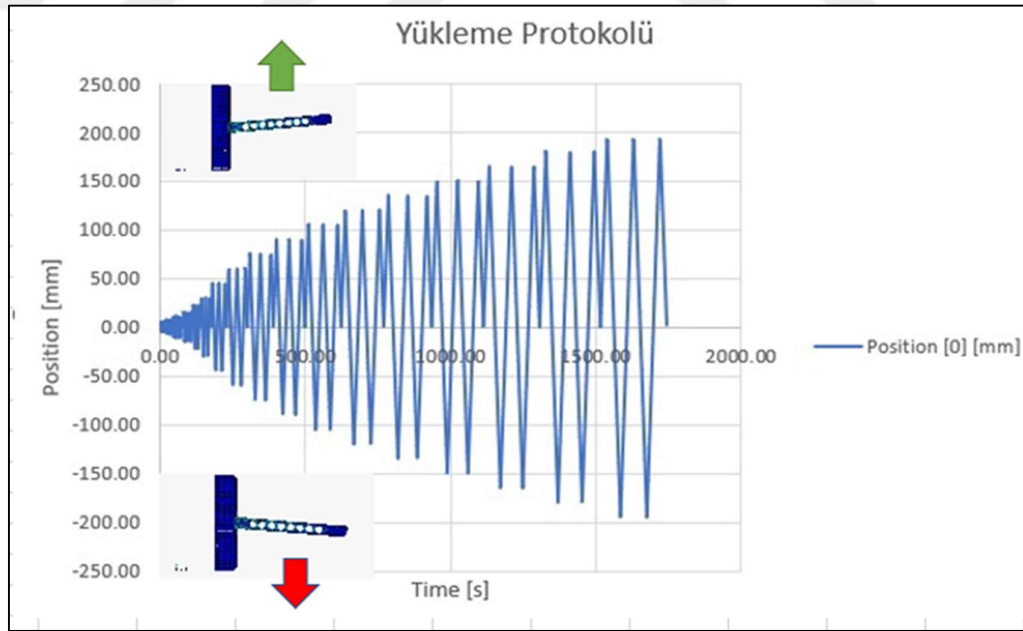
Şekil 4.17.’de gösterilmiş modelin sınır koşulları deney mekanizmamızla tutarlıydı. Kolon alt başlığının yüzeyinin tamamı zemin yüzeyine ankastre olarak bağlandı kolonun alt yüzeyin tamamı tüm yönlerinde bulunan öteleme serbestlik derecesi yani  $U_1 = U_2 = U_3 = 0$  ve dönme serbestlik dereceleri yani  $UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$  şeklinde sınırlandırılmıştır. Kirişin öteleme serbestlik derecesi sınırlamak için kirişin ucundan 2.350 mm mesefede  $U_1 = 0$  şeklinde sınırlandırılmıştır.

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kirişin ucundan 2.380 mm mesafeden bulunan R<sub>1</sub> noktasına artan yer değıştirme genliğine sahip Şekil 4.18.' de gösterilen FEMA-350 yükleme protokolü döngüsel yük uygulandı.

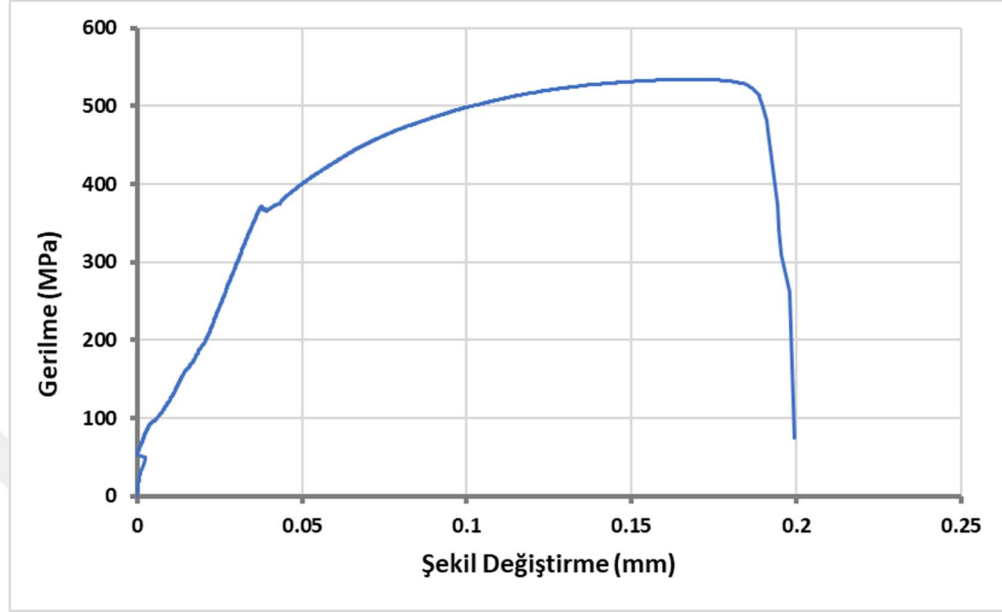


Şekil 4.17. FEM modelinde kullanılan yükler



Şekil 4.18. Deneyde kullanılan yükleme protokolü

## 4.2.3. Malzeme özellikleri ve numune modeli kalibrasyonu



Şekil 4.19. S235 çeliğinin deneyden önce yapılan çekme testi sonucu

Çizelge 4.5. ve Şekil 4.19.' da gösterilen malzeme özellikleri verilmiş kolon, kiriş, alın levhası ve berkitme levhaları S235 çeliği kullanılarak yapılmıştır. Yoğunluğu  $7,85E-009 \text{ t/mm}^3$ , Young modülü 200 GPa akma gerilimi ( $f_y$ ) değerleri ile gerinim sertleştirilmesi olmadan, çift doğrusal gerilim-şekil değiştirme diyagramı ile modellenmiştir. Numunenin poisson oranı 0.3 olarak simüle edilmiştir. S235 çeliği için ABAQUS programına analiz edilen veriler Çizelge 4.5.' de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deneyde kullanılan bütün elemanların özellikleri

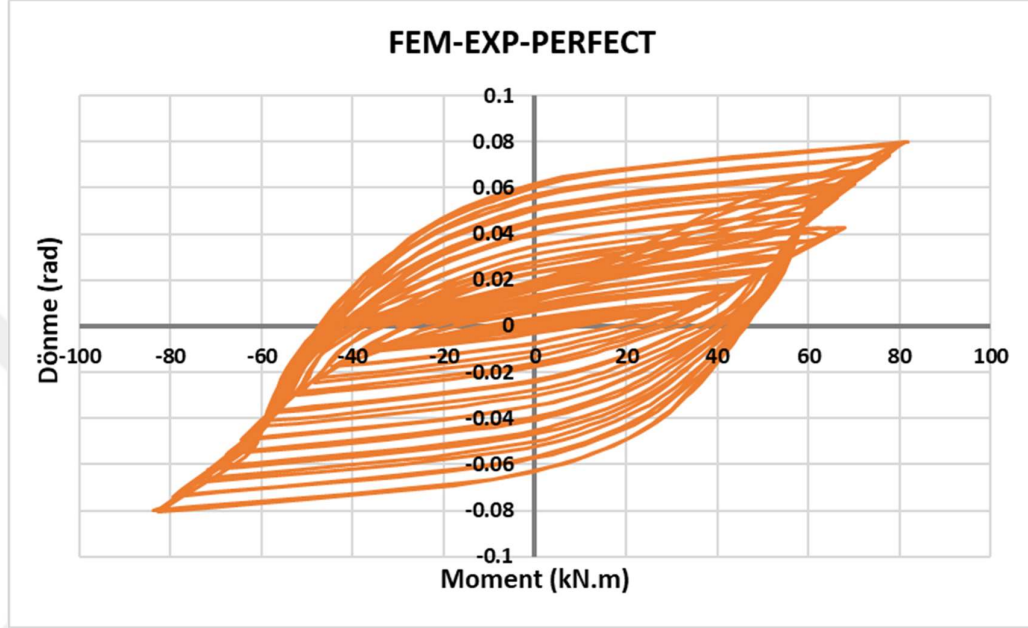
	Akma Gerilimi (MPa)	Plastik Gerilimi (MPa)
1	215	0
2	360	0,2

## 4.2.4. Sonlu eleman modeli sonuçlarının karşılaştırılması

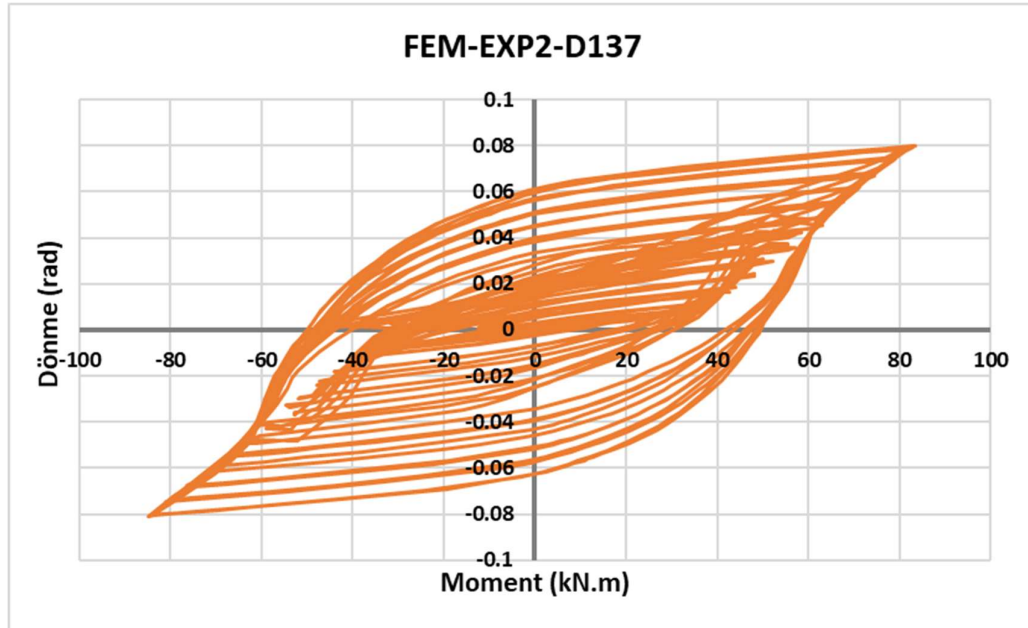
Şekil 4.20., Şekil 4.21., Şekil 4.22., Şekil 4.23. ve Şekil 4.24. modellerin moment-dönme eğrileri Şekil 4.25., Şekil 4.26., Şekil 4.27., Şekil 4.28. ve Şekil 4.29.' da yük-deplasman eğrileri gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.6. da deney sonuçları verilmiştir.

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

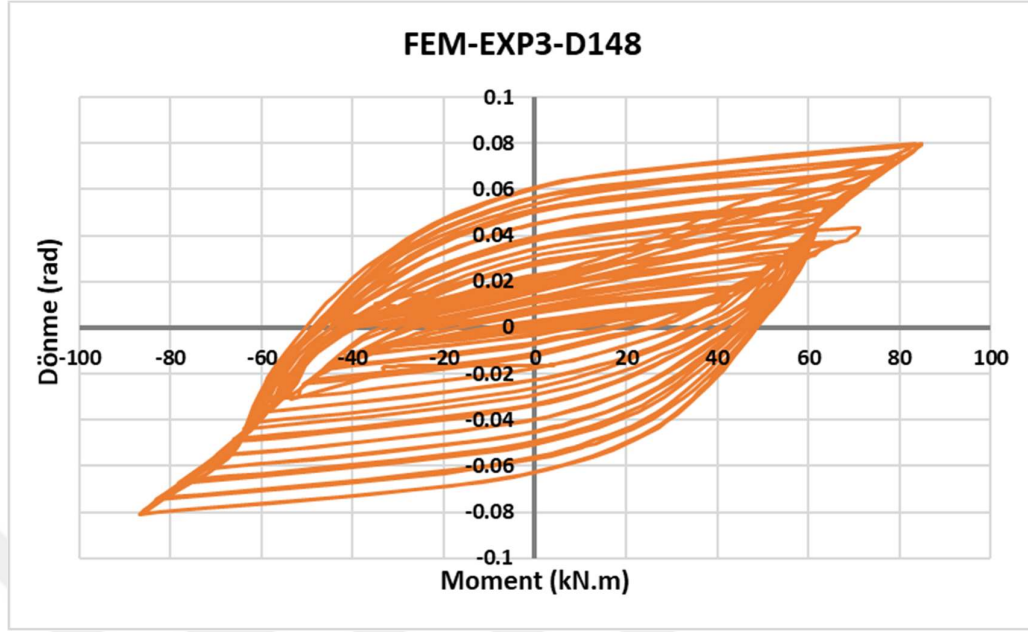
Deney sonuçları FEM-EXP-PERFECT numunesine göre karşılaştırılmıştır. Geometrik sınır şartlara uyularak kirişler üzerinde açılan dairesel boşlukların çapları arttıkça maksimum moment ve maksimum kuvvet değerleri Çizelge 4.6.'de verilmiştir.



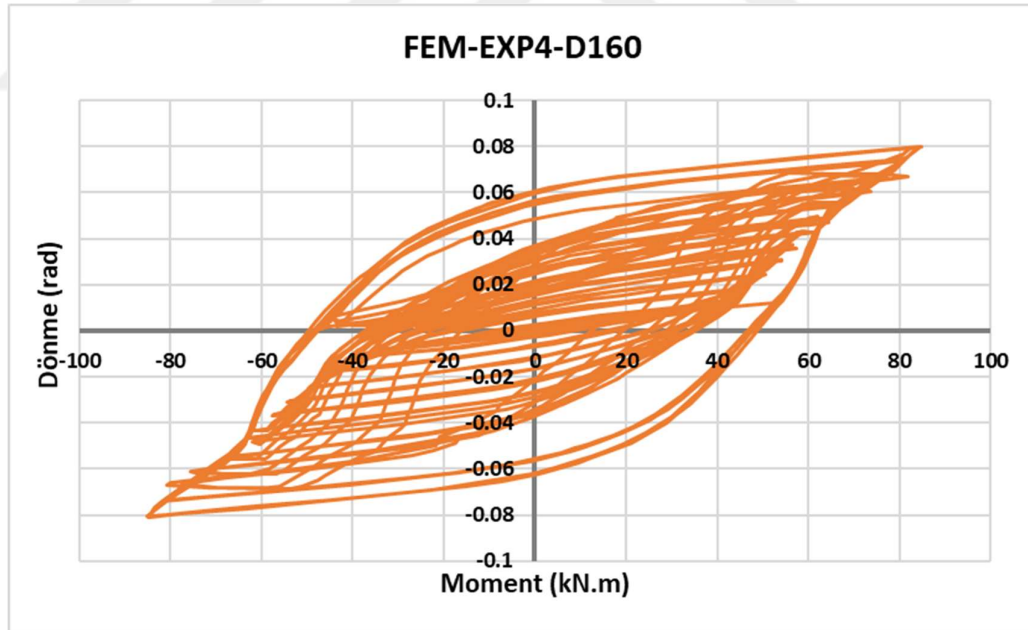
Şekil 4.20. FEM-EXP-PERFECT numunesinin moment-dönme grafiğidir



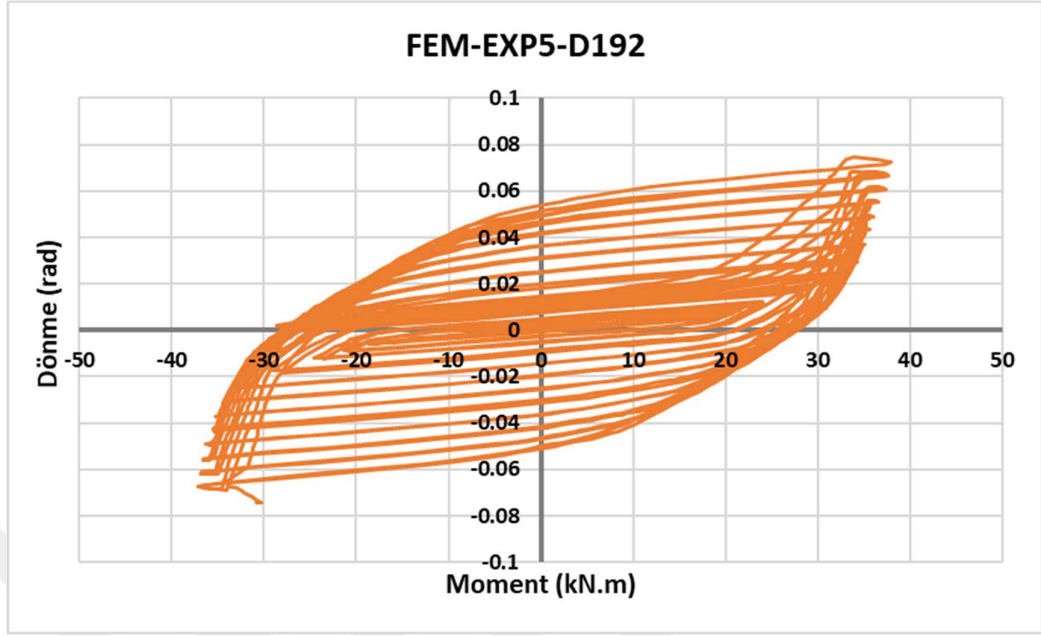
Şekil 4.21. FEM-EXP2-D137 numunesinin moment-dönme grafiğidir



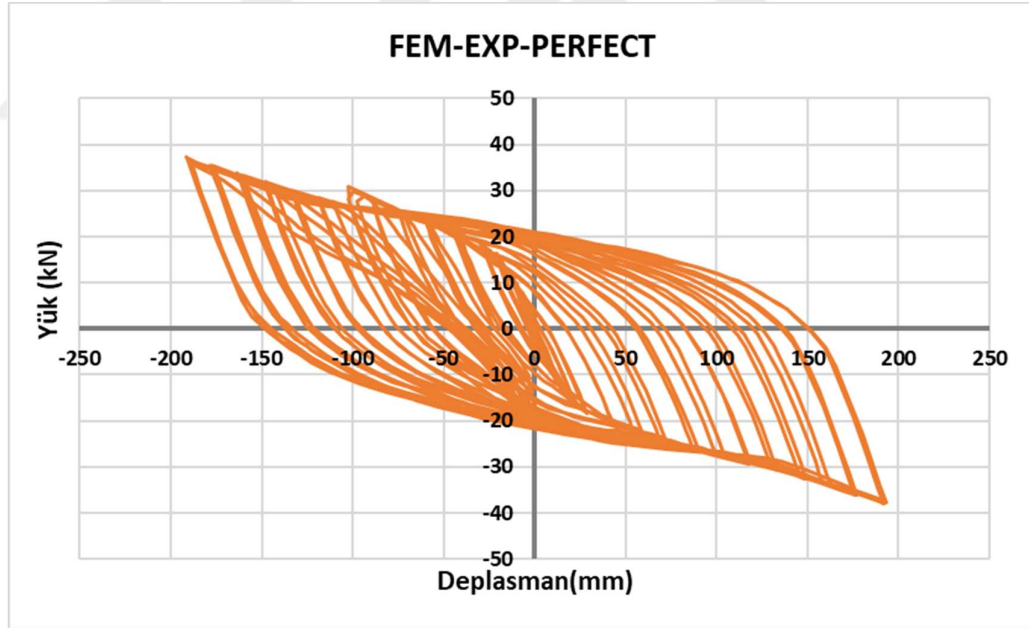
Şekil 4.22. FEM-EXP3-D148 numunesinin ( $H_s/D_0=1,618$  (altın orana) göre tasarlanan numune) moment-dönme grafiğidir.



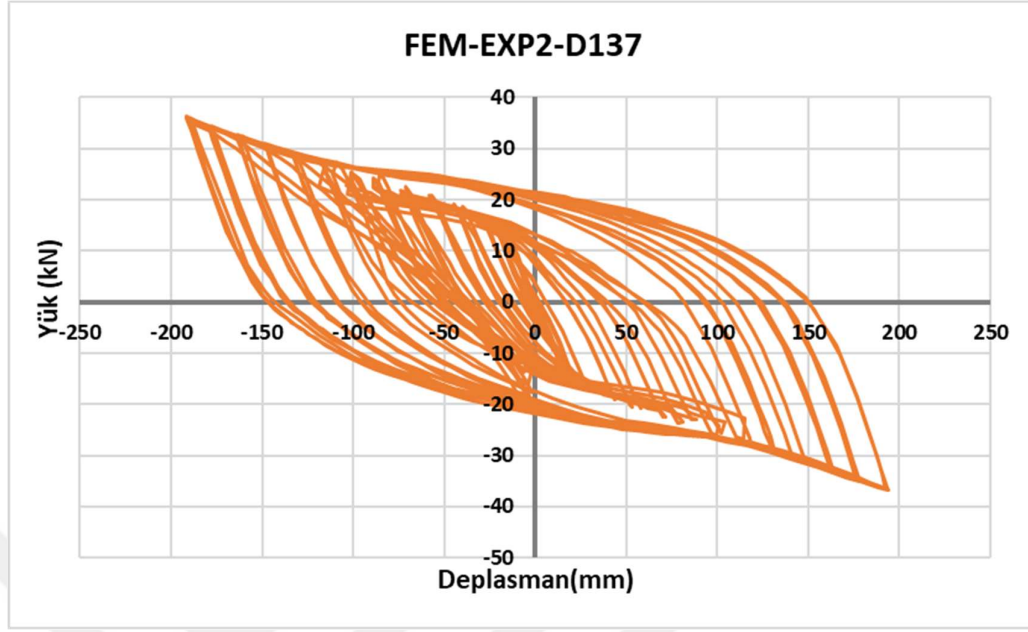
Şekil 4.23. FEM-EXP4-D160 numunesinin moment-dönme grafiğidir



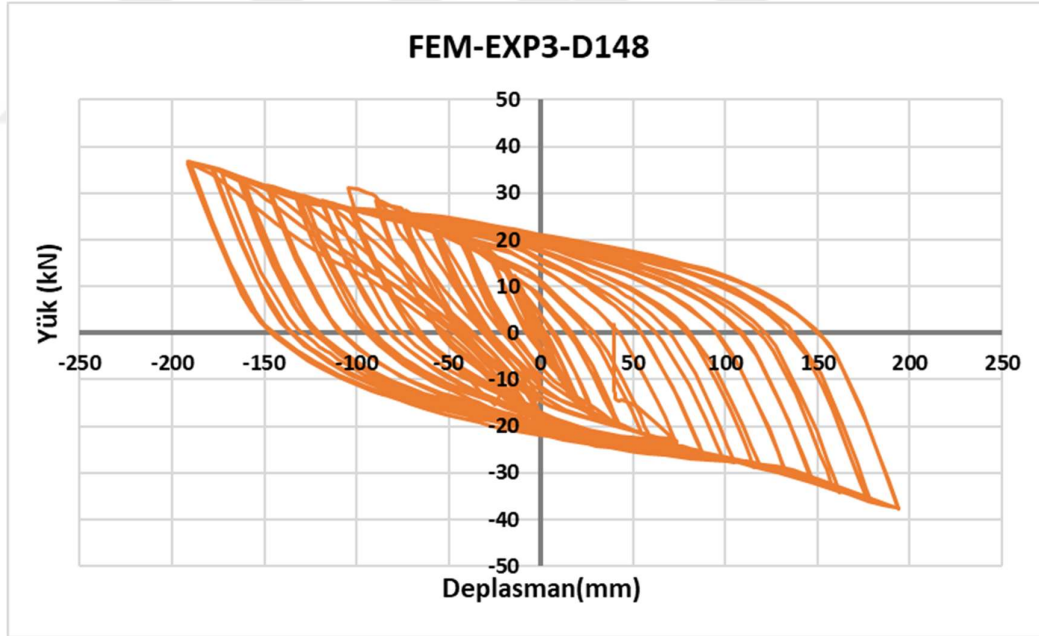
Şekil 4.24. FEM-EXP5-D192 numunesinin moment-dönme grafiğidir



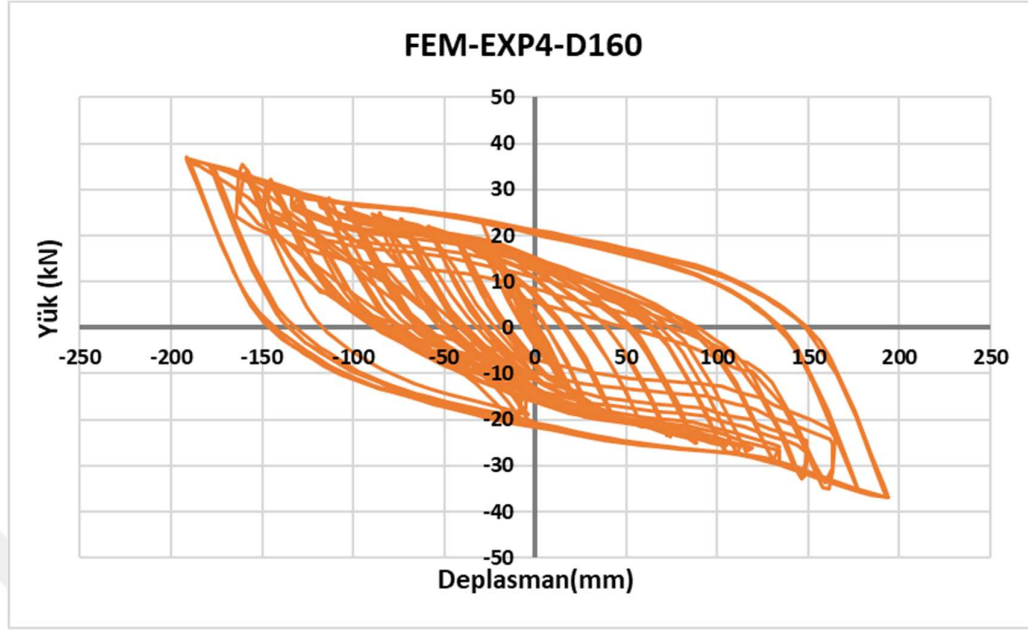
Şekil 4.25. FEM-EXP-PERFECT numunesinin yük-deplasman grafiğidir



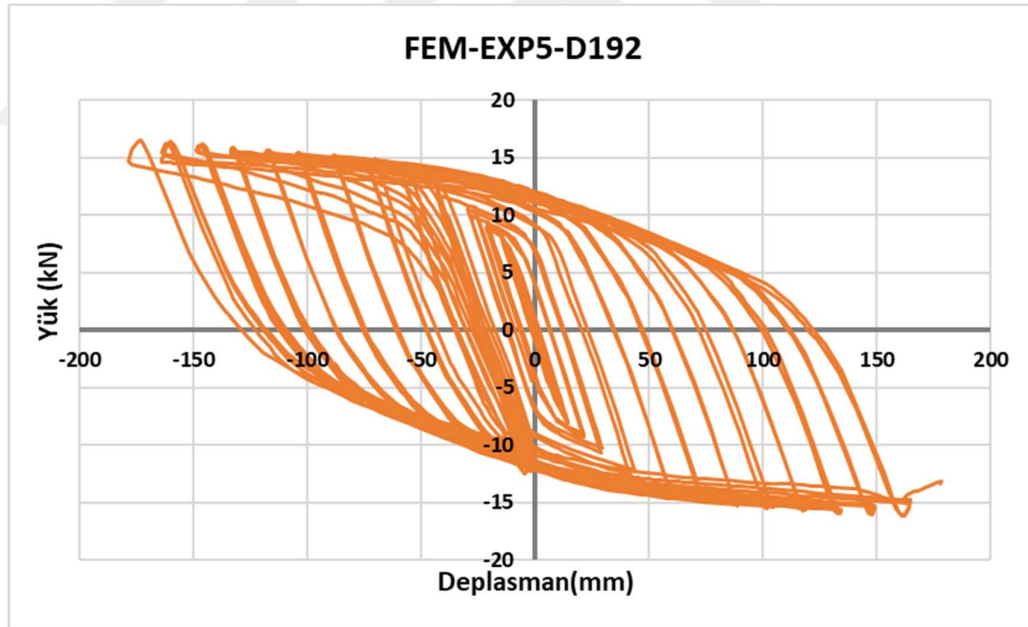
Şekil 4.26. FEM-EXP2-D137 numunesinin yük-deplasman grafiğidir



Şekil 4.27. FEM-EXP3-D148 numunesinin ( $H_s/D_0=1,618$  (altın orana) göre tasarlanan numune) yük-deplasman grafiğidir.



Şekil 4.28. FEM-EXP4-D160 numunesinin yük-deplasman grafiğidir



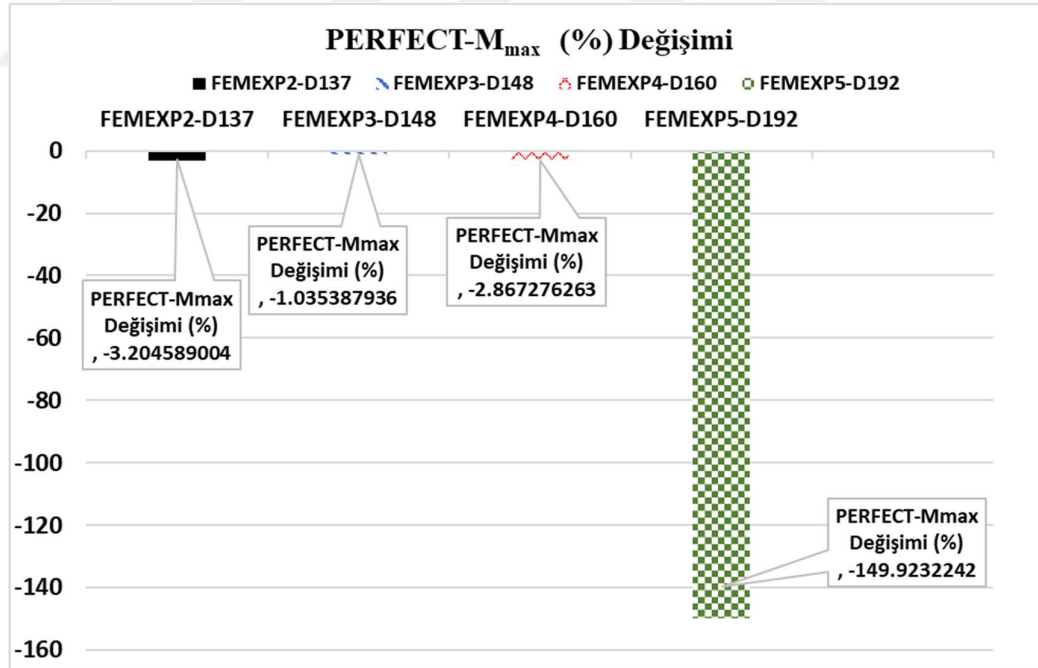
Şekil 4.29. FEM-EXP5-D192 numunesinin yük-deplasman grafiğidir

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

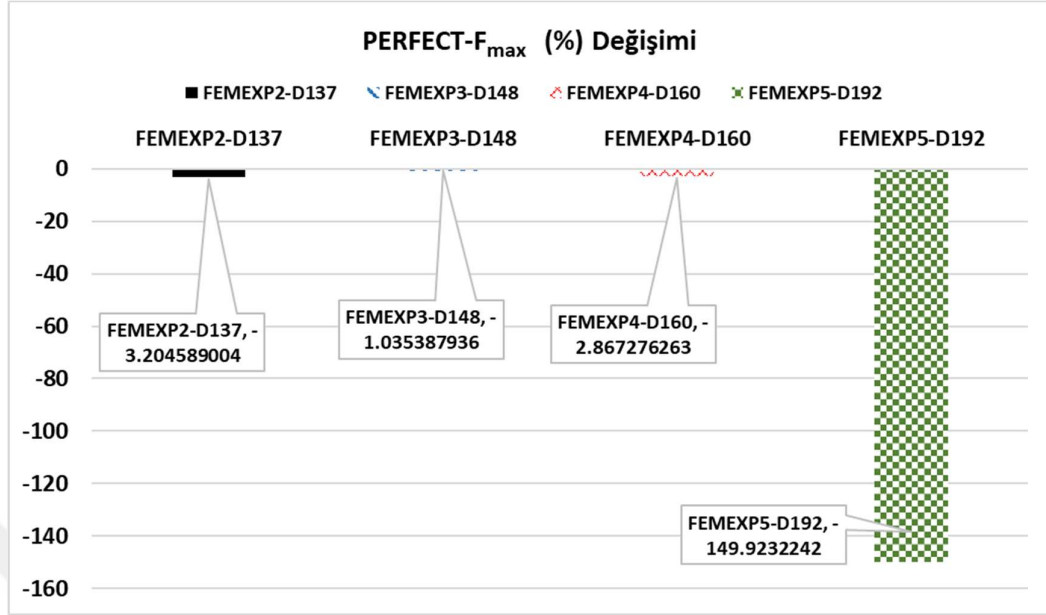
Analizde kullanılan modellerin isimleri sırasıyla FEM-EXP-PERFECT, FEM-EXP2-D137, FEM-EXP3-D148, FEM-EXP4-D160, FEM-EXP5-D192 olmak üzere 5 adettir. Tüm modellerde deneyde kullanılan numune ve parçlar boyutları 1/1 ölçekte modellenmiştir.

**Çizelge 4.6.** Kontrol numunesine göre, modellenen numunelerin Mmax Değişimi (%) ve Fmax değişimi (%).

NUMUNELER	M max (kN.m)	Fmax (kN)	PERFECT-Mmax Değişimi (%)	PERFECT-Fmax Değişimi (%)
FEM-EXP-PERFECT	87,58	38,08	0	0
FEM-EXP2-D137	84,78	36,86	-3,20	-3,20
FEM-EXP3-D148	86,68	37,68	-1,04	-1,04
FEM-EXP4-D160	85,07	36,99	-2,87	-2,87
FEM-EXP5-D192	-43,73	-19,01	-149,92	-149,92



**Şekil 4.30.** Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre maksimum moment ( $M_{max}$ ) değişimi (%).



Şekil 4.31. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre  $F_{max}$  değişimi (%)

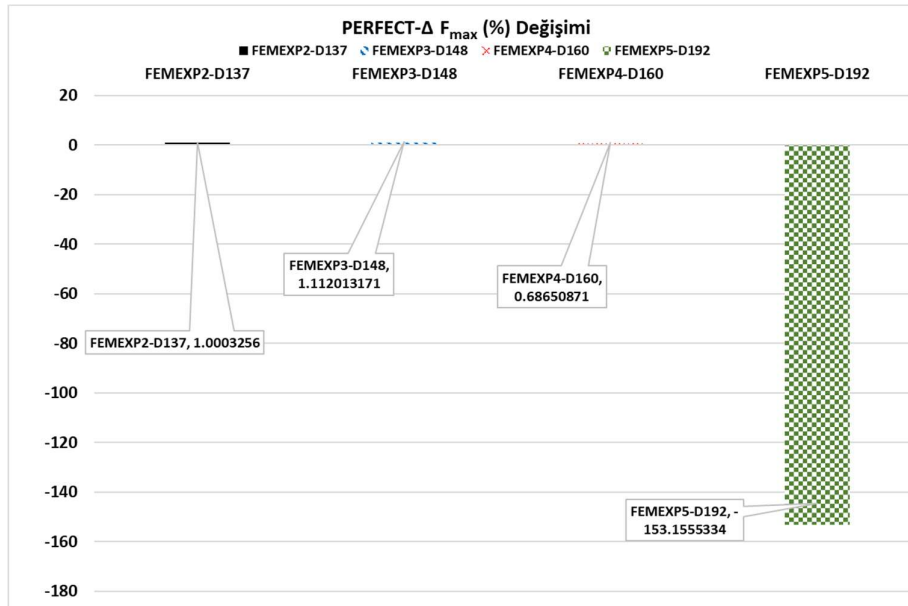
FEM-EXP-PERCET numunesini delik çapları artacak şekilde diğer numunelerle karşılaştırıldığında genel olarak maksimum moment ve maksimum kuvveti azalmıştır (Şekil 4.30.ve Şekil 4.31.). FEM-EXP2-D137 ile FEM-EXP3-D148 numuneleri karşılaştırıldığında delik çapı 148 mm olan FEM-EXP3-D148 numunesi yani geometrik sınır şartı altın orana göre tasarlanan dairesel boşluklu petek kiriş maksimum moment ve maksimum kuvveti delik çapı 137 mm olan FEM-EXP2-D137 numunesine göre daha fazladır (Çizelge 4.6.). Sonuç olarak Şekil 4.30. ve Şekil 4.31.' de görüldüğü gibi delik çapı arttıkça maksimum moment ve maksimum yük azalmakta. Ayrıca delik çaplarını kıyasladığımızda tasarımımızda altın oran kullanıldığında (FEM-EXP3-D148) Maksimum moment ve maksimum yük FEM-EXP2-D137 numuneye göre artış göstermiştir. Sonuç olarak altın oranlı delik çapına sahip numune kendinden küçük delik çapına sahip numuneye göre maksimum momenti ve maksimum yük kapasitesi bakımından daha büyük değerlere ulaşmıştır.

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMENLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

**Çizelge 4.7.** Kontrol numunesine göre, modellenen numunelerin  $\Delta F_{max}$  değişimi (%) ve  $\Theta F_{max}$  değişimi (%).

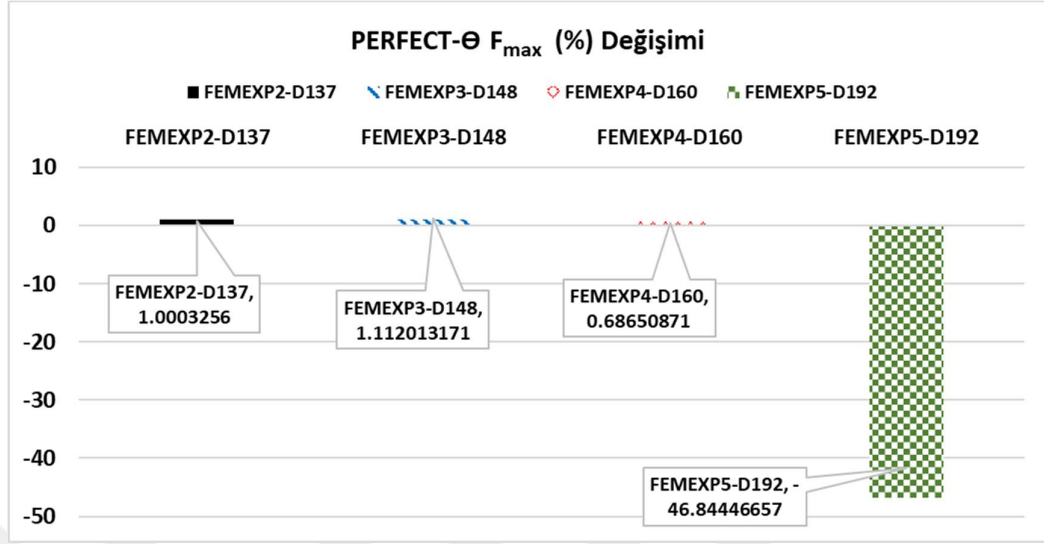
NUMUNELER	$\Delta F_{max}$ (mm)	$\Theta F_{max}$ (rad)	PERFECT- $\Delta F_{max}$ Değişimi (%)	PERFECT- $\Theta F_{max}$ Değişimi (%)
FEM-EXP-PERFECT	192,05	0,08	0	0
FEM-EXP2-D137	193,97	0,08	1,00	1,00
FEM-EXP3-D148	194,18	0,08	1,11	1,11
FEM-EXP4-D160	193,37	0,08	0,69	0,69
FEM-EXP5-D192	-102,08	0,04	-153,16	-46,84

Çizelge 4.7., Şekil 4.32. ve Şekil 4.33.'de gösterildiği gibi FEM-EXP-PERFECT numunesinin diğer numunelerle kıyaslandığında maksimum yer değiştirme değeri ( $\Delta F_{max}$ ) ve maksimum dönme değeri ( $\Theta F_{max}$ ) altın oran ile tasarlanan FEMEXP3-D148 numunesi %1,11 oranında artış gösterirken diğer numuneler azalma göstermiştir.



**Şekil 4.32.** Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre  $\Delta F_{max}$  değişimi (%)

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ



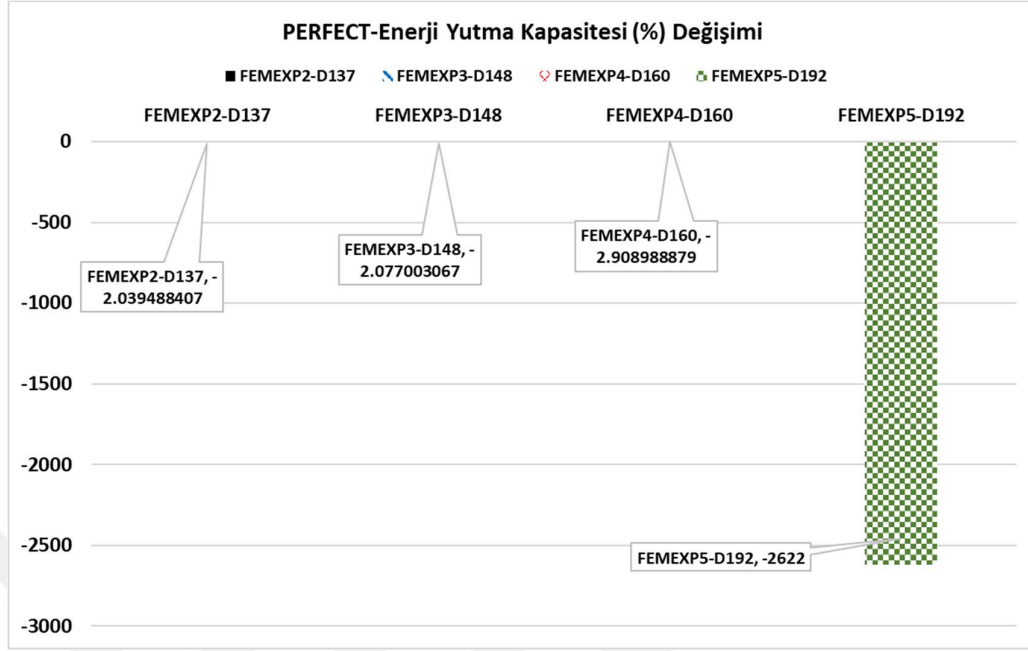
Şekil 4.33. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre  $\Theta F_{max}$  değişimi (%)

Çizelge 4.8. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre enerji yutma kapasitesi değişimi (%).

NUMUNELER	Enerji Yutma Kapasitesi (kN.m.rad)	PERFECT-Enerji Yutma Kapasitesi Değişimi (%)
FEMEXP-PERFECT	11,89	0
FEMEXP2-D137	11,64	-2,04
FEMEXP3-D148	11,64	-2,08
FEMEXP4-D160	11,54	-2,91
FEMEXP5-D192	-299,85	-2.622

Çizelge 4.8. ve Şekil 4.34.'de gösterildiği gibi EXP-PERFECT numunesinin enerji yutma kapasitesi diğer numunelerle kıyaslandığında altın oran ile tasarlanan EXP3-D148 numunesi %2,077 gibi küçük bir oranda azalma göstermişken diğer numuneler EXP-PERFECT numunesine en yakın %2,91 oranında daha az enerji yutmuştur.

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 4.34. Kontrol sonlu elemanlar numunesine göre enerji yutma kapasitesi değişimi (%).

Sonuç olarak delik çapı arttıkça enerji yutma kapasitesi azalmaktadır ama altın oran kullanılarak tasarlanan model perfect modele daha yaklaşık değer vermiştir.

#### 4.2.5. Deneysel ve FEM verilerinin kıyaslanması

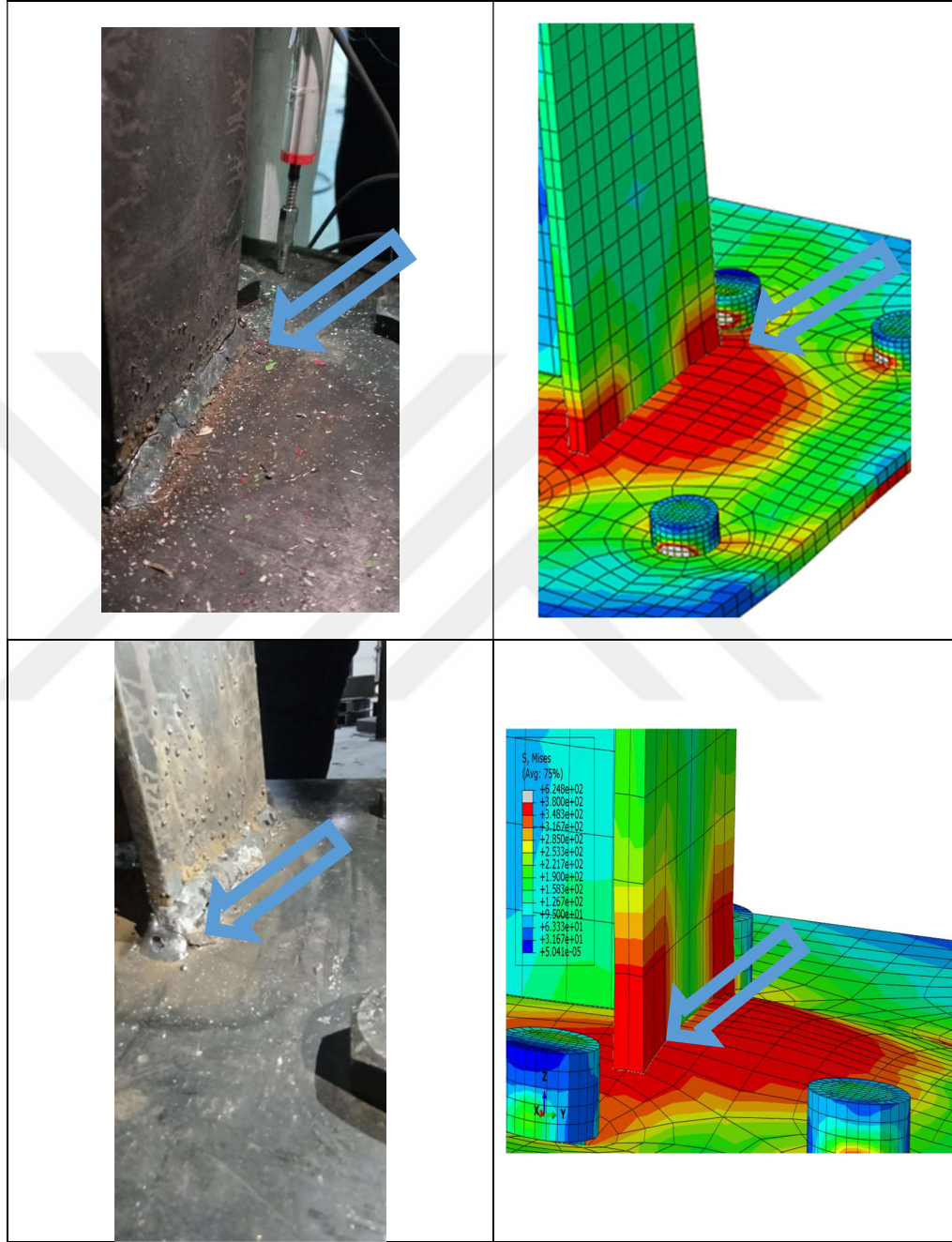
Çizelge 4.9. Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen değerlerin, deneyler sonucu elde edilen değerlere göre değişimi (%).

NUMUNE	Mmax (EXP/FEM)	Fmax (EXP/FEM)	$\Delta$ Fmax (EXP/FEM)	$\Theta$ Fmax (EXP/FEM)	Enerji Yutma Kapasitesi (EXP/FEM)
PERFECT	-31,53	-37,51	9,45	9,45	12,56
D137	4,70	4,70	38,97	38,97	33,40
D148	-5,46	-5,46	0,52	0,52	14,38
D160	13,37	13,37	30,30	30,30	30,59
D192	196,51	196,51	187,07	12,93	101,67

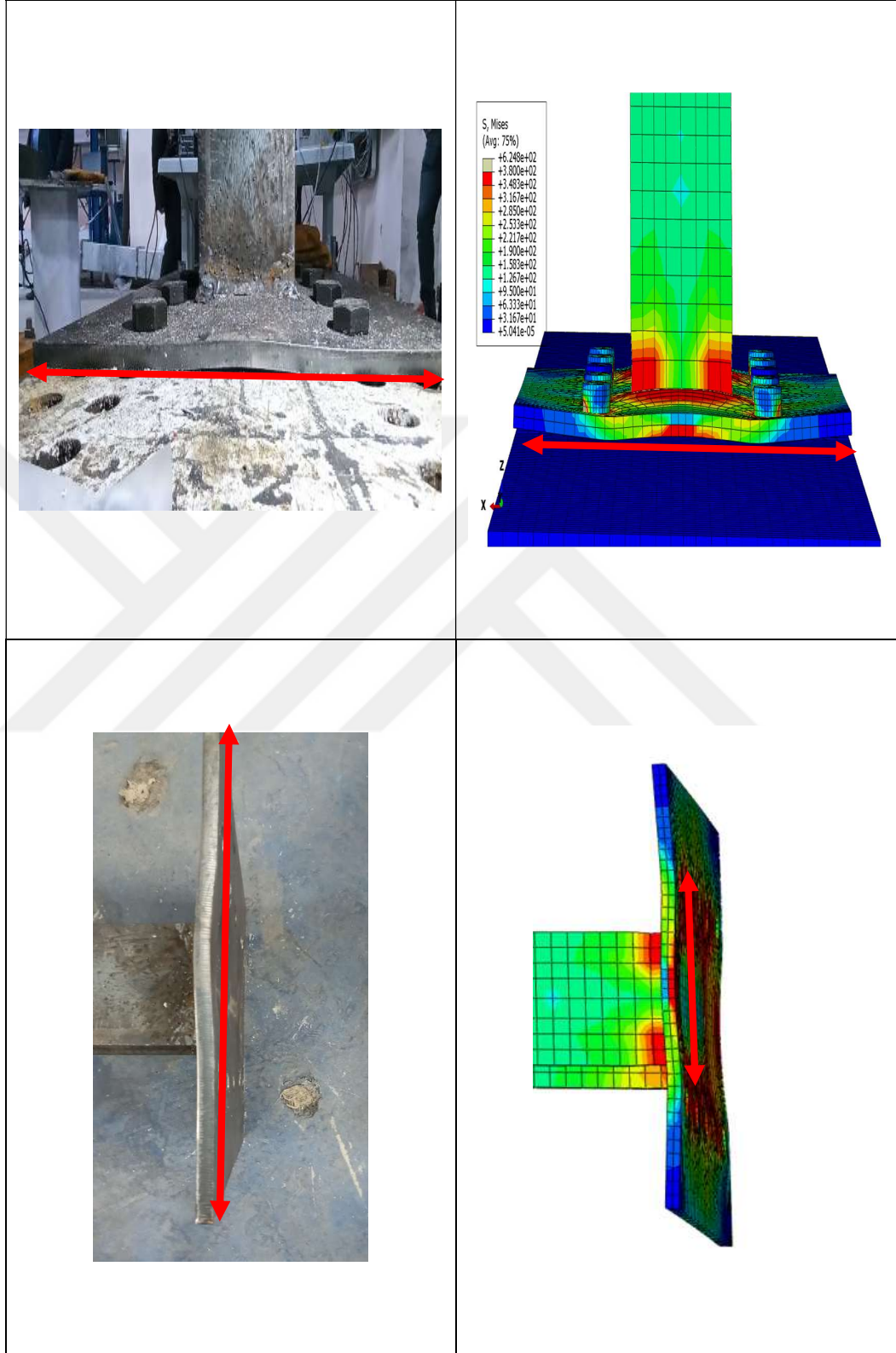
#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çizelge 4.9. baktığımızda sonlu eleman modeli, test sonuçlarına göre doğrulanmıştır. Çizelge 7.4. te, incelenen tüm numuneler için test sonuçlarının (M-EXP) sayısal sonuçlarla (M-FEA) karşılaştırması gösterilmektedir. M-EXP/M-FEA oranının ortalama değeri 1,03' dür ve karşılık gelen varyasyon katsayısı (COV) 0,16' dır. (F-EXP) sayısal sonuçlarla (F-FEA) karşılaştırması gösterilmektedir. M-EXP/M-FEA oranının ortalama değeri 1,04' dür ve karşılık gelen varyasyon katsayısı (COV) 0,19'dur. ( $\Delta$  F-EXP) sayısal sonuçlarla ( $\Delta$  F-FEA) karşılaştırması gösterilmektedir.  $\Delta$ F-EXP/ $\Delta$ F-FEA oranının ortalama değeri 0,8' dir ve karşılık gelen varyasyon katsayısı (COV) 0,19' dur. ( $\Theta$ F-EXP) sayısal sonuçlarla ( $\Theta$ F-FEA) karşılaştırması gösterilmektedir.  $\Theta$ F-EXP/  $\Theta$ F-FEA oranının ortalama değeri 0,8' dir ve karşılık gelen varyasyon katsayısı (COV) 0,19' dur. Enerji Yutma Kapasitesi-EXP sayısal sonuçlarla Enerji Yutma Kapasitesi-FEA karşılaştırması gösterilmektedir. Enerji Yutma Kapasitesi-EXP/ Enerji Yutma Kapasitesi-FEA oranının ortalama değeri 0,6'dır ve karşılık gelen varyasyon katsayısı (COV) 0,56' dır. FEA'da elde edilen göçme modunu ve tüm test numuneleri için yapılan testleri görülmektedir. Genel olarak, sonlu elemanlar analizi sonuçları, moment kapasitesi ve göçme modu açısından deneysel sonuçlarla makul korelasyonlar göstermiştir. Genel olarak bu farkların sebepleri şöyle sıralanabilir: Kusurlar; malzeme özellikleri; test numunelerinin gerçek boyutları ve döngüsel yükleme etkilerine ek olarak bulonların kayması.

4.2.6. Deneysel ve Fem Analizlerinin Resimlerle Analizi



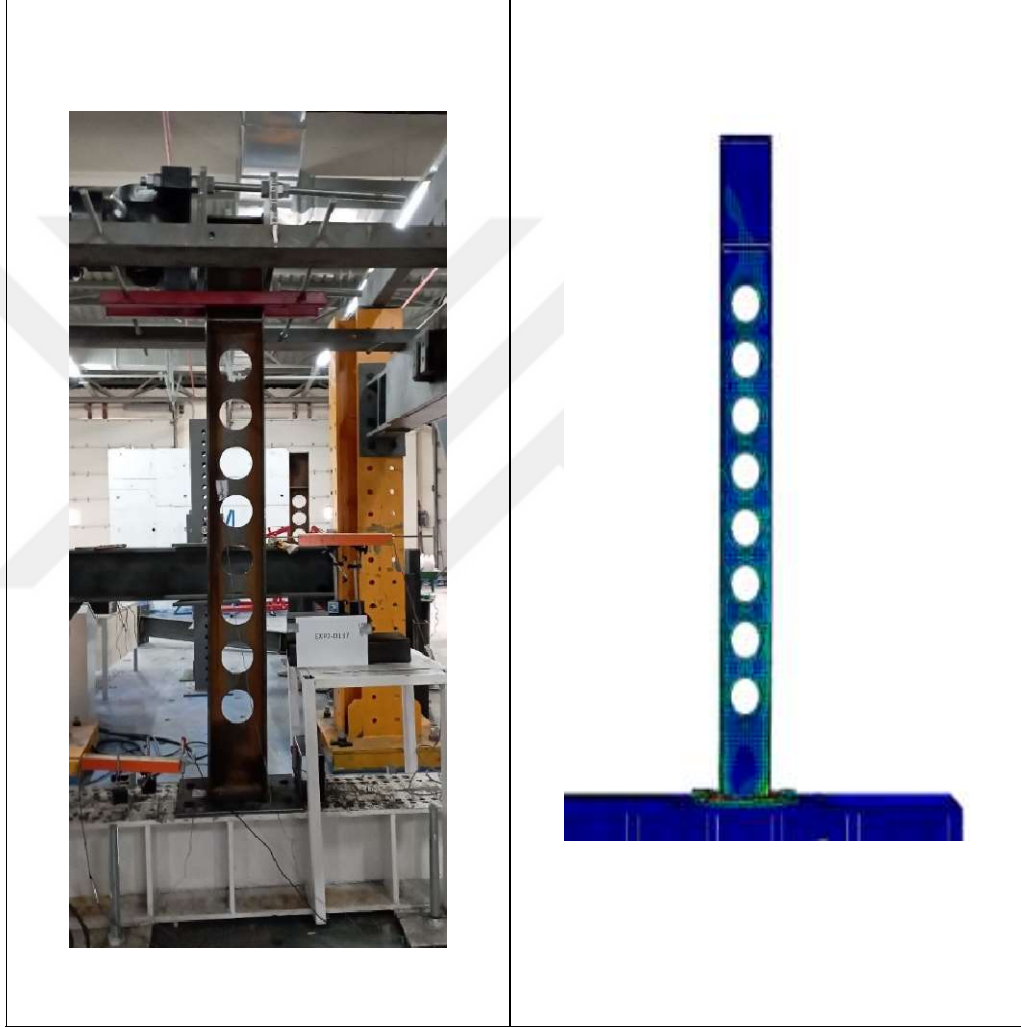
Şekil 4.35. Plastik mafsall oluşumu işaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP-PERFECT)



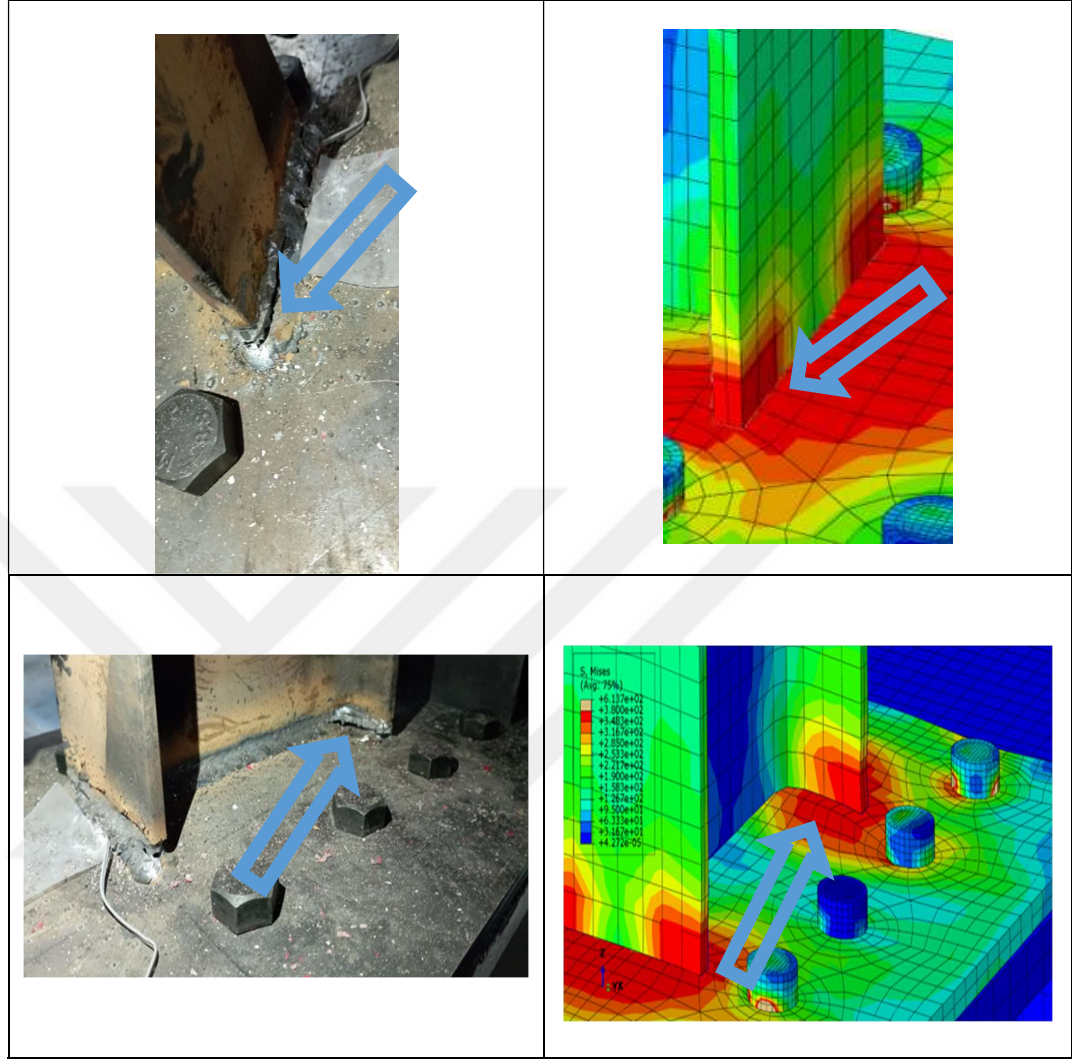
Şekil 4.36. Alın levhasında kirişin temas ettiği bölgelerde şekil değişimi oluşmuştur (EXP-PERFECT).

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLAR SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

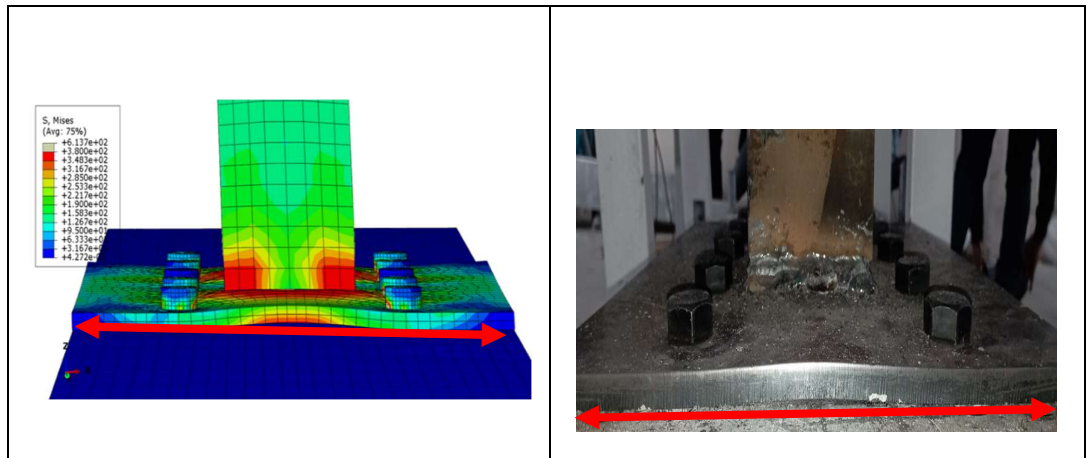
EXP-PERFECT modeli deney ve sonlu elemanlar analizi sonunda Şekil 4.35. de görüldüğü gibi kirişlerle alın levhası birleşim bölgesindeki kaynakta kırılmalar mevcuttur. Şekil 4.36. ye bakıldığında deney ve analiz sonucunda alın levhasında sinüs şekil değiştirmeler oluşmuştur.



Şekil 4.37. Delik çapı  $D=137$  mm olan kirişde hiçbir göçme modu oluşmamıştır (EXP2-D137).



Şekil 4.38. Plastik mafsals oluşumu işaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP2-D137)



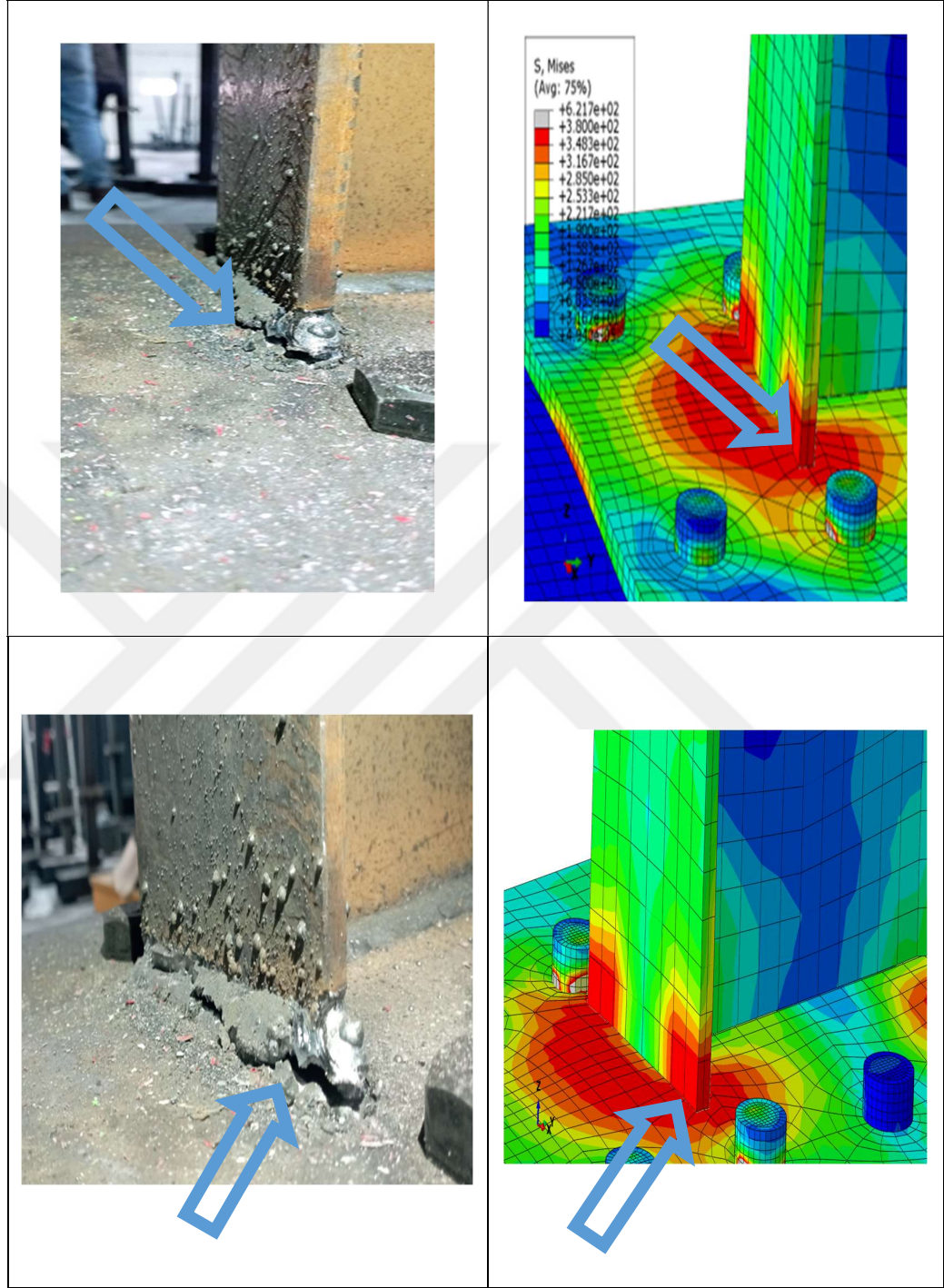
Şekil 4.39. Alın levhasında krişin temas ettiği bölgelerde şekil değişimi oluşmuştur (EXP2-D137).

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLAR SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

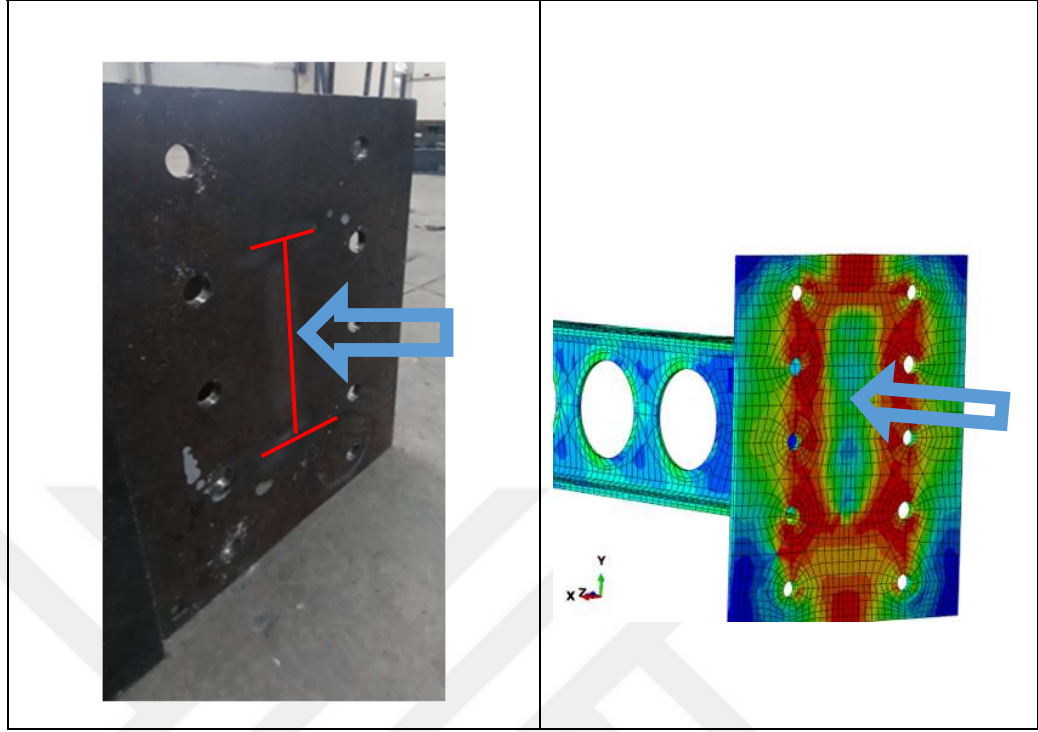
EXP2-D137 numunesinde hiçbir şekil değişimi yoktur (Şekil 4.37.). Alın levhasıyla kirişin birleşim bölgesinde plastik mafsall oluşmuştur (Şekil 4.38.). Alın levhasında sinüs şekil değiştirmeler oluşur (Şekil 4.39.).



Şekil 4.40. Delik çapı  $D=148$  mm olan kirişde hiçbir göçme modu oluşmamıştır (EXP3-D148).



Şekil 4.41. Plastik mafsall oluşumu işaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP3-D148)

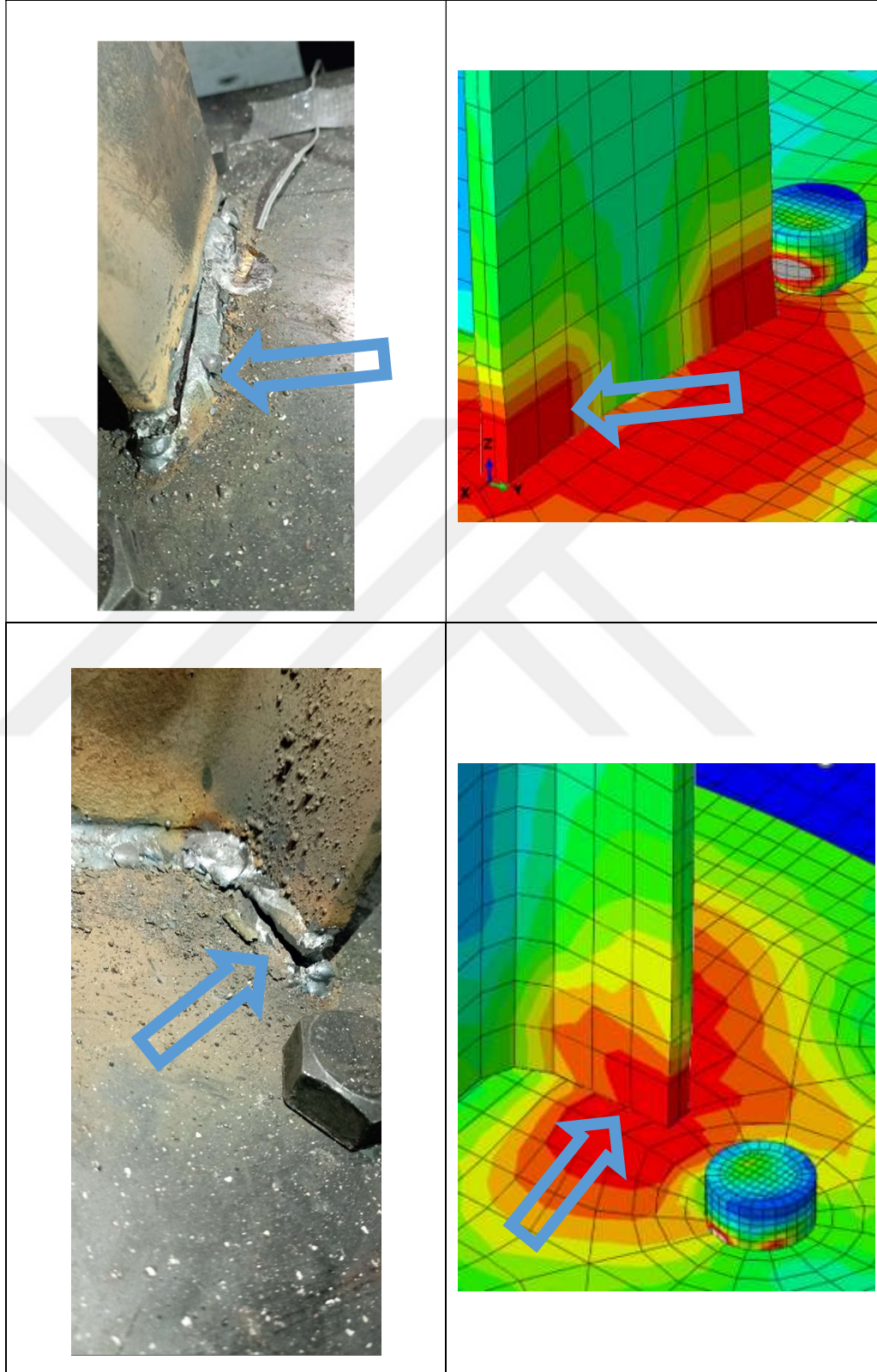


**Şekil 4.42.** Alın levhasında kirişin temas ettiği bölgelerde işaretlerin gösterdiği yönde şekil değişimi oluşmuştur (EXP3-D148).

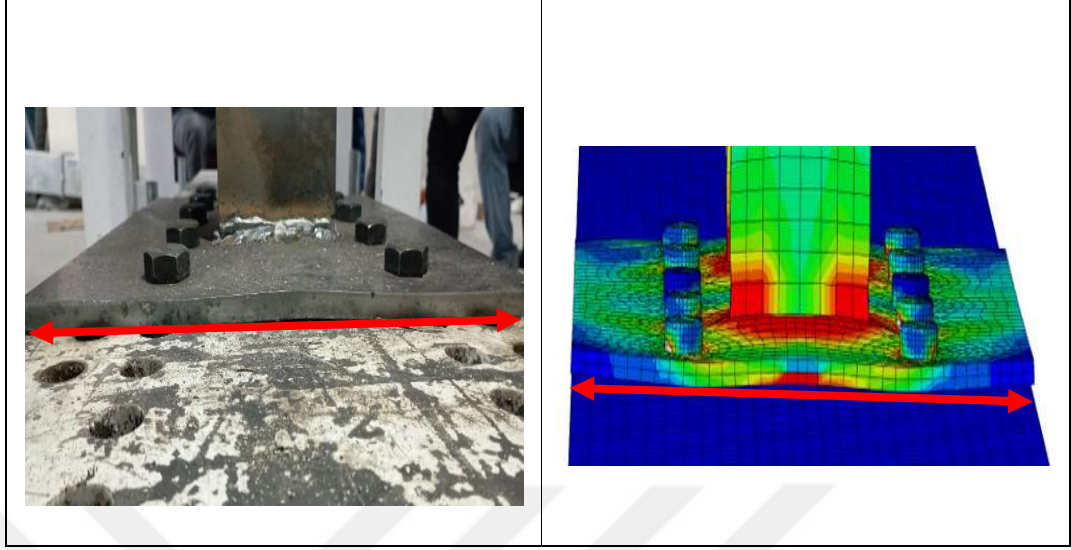
Kiriş yüksekliğinin delik çapına oranı altın orana eşitlenen numune (EXP3-D148) hiçbir şekil değişimi oluşmamıştır (Şekil 4.40.). Alın levhasıyla kirişin birleşim bölgesinde plastik mafsal oluşmuştur (Şekil 4.41.). Alın levhasında sinüs şekil değiştirmeler oluşur (Şekil 4.42.).



Şekil 4.43. Delik çapı  $D=160$  mm olan kirişde hiçbir göçme modu oluşmamıştır (EXP4-D160).

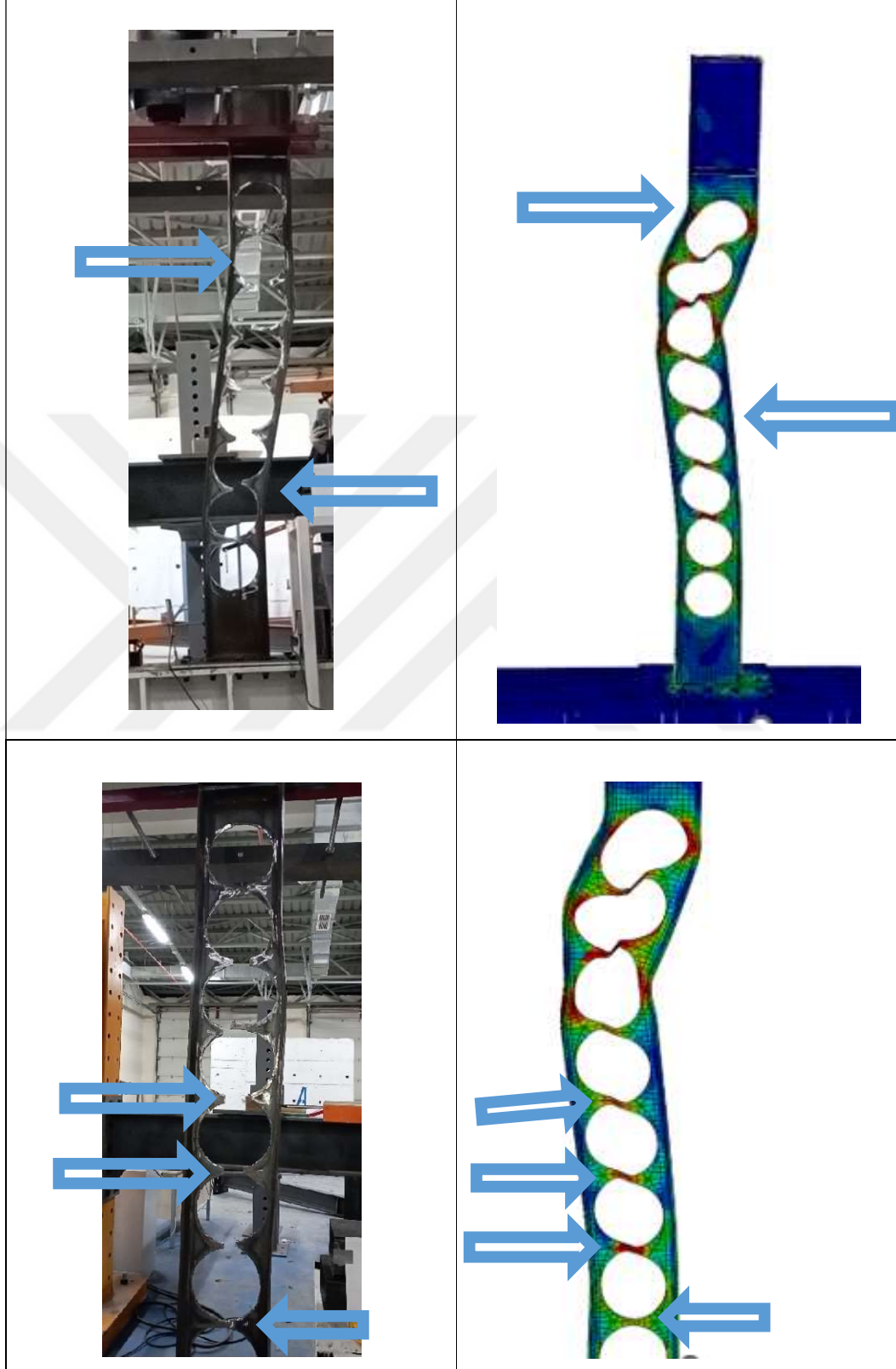


Şekil 4.44. Plastik mafsal oluşumu işaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP4-D160)

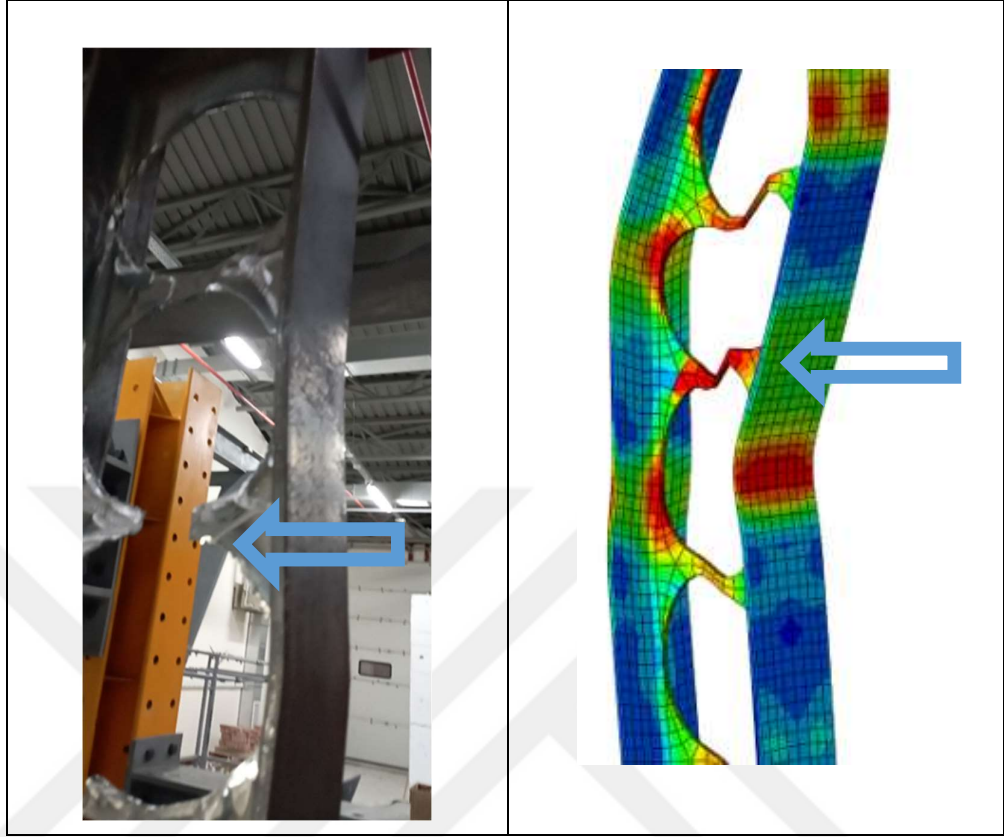


Şekil 4.45. Alın levhasında kirişin temas ettiği bölgelerde şekil değişimi oluşmuştur (EXP4-D160).

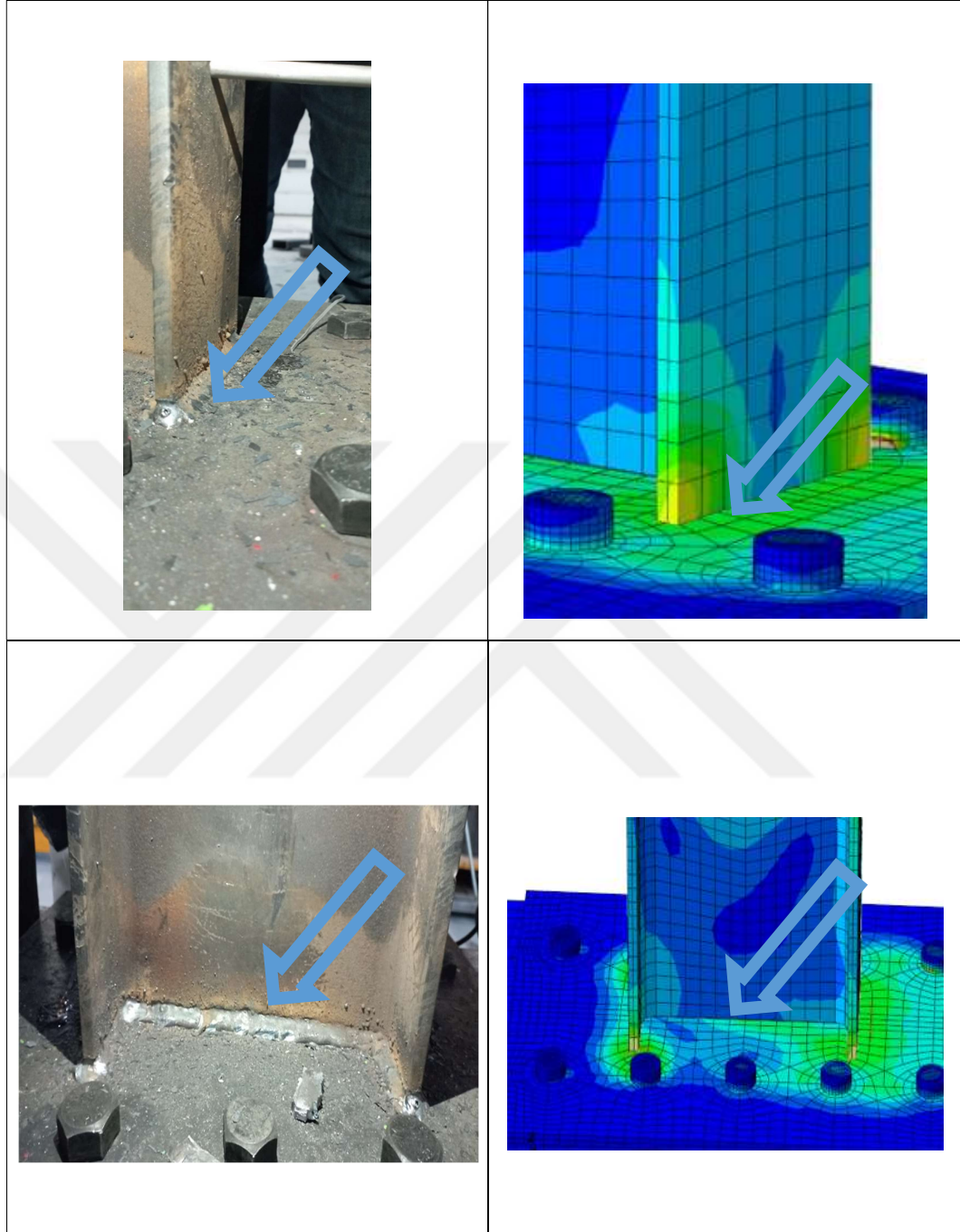
EXP4-D160 numunesinde hiçbir şekil değişimi yoktur (Şekil 4.43.). Alın levhasıyla kirişin birleşim bölgesinde plastik mafsall oluşmuştur (Şekil 4.44.). Alın levhasında sinüs şekil değiştirmeler oluşur (Şekil 4.45.).



Şekil 4.46. Vierendeel mekanizması görülmüştür (EXP5-D192)



Şekil 4.46. (Devam)



Şekil 4.47. Plastik mafsall oluşmamıştır. İşaretlenen yerlerde gösterilmiştir (EXP5-D192)

EXP5-D192 numunesinde Vierendeel mekanizması görülmüştür (Şekil 4.48.). Alın levhasıyla kirişin birleşim bölgesinde plastik mafsall oluşmamıştır (Şekil 4.47.). Alın levhasında sinüs şekil değiştirmeler oluşmamıştır.

#### 4. DENEY VE SONLU ELEMANLAR SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tüm şekillere bakıldığında deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerdeki kusurlar aynı olduğu görülmüştür.



## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tezde 5 adet 1/1 ölçekli 2.400mm uzunluğunda I profilinin  $1,25 < H_s/D_0 < 1,75$  daki geometrik sınır şartlara göre tasarlanan 4 farklı delik çapına sahip petek kirişlerin ve deliksiz perfect kirişin FEMA-350 yükleme protokolü altında deneysel ve FEM (ABAQUS) analizleri yapılmıştır. Deneylerde farklı delik çapına sahip kirişlerin döngüsel yük altındaki davranışları incelenmiştir.

Tezin amacı aynı yüksekliğe sahip kirişlerin ölü yükünü azaltıp taşıma kapasitelerini artırmaktır. Doğada, sanatta, mimaride, matematikte bulunan ve kullanılan altın oranın petek kiriş tasarımlarında etkisini incelemek ayrıca  $1,25 < H_s/D_0 < 1,75$  geometrik sınır şartların araştırması amacıyla deneysel ve sayısal elemanlar methodu kullanılarak yapılmıştır. Yaptığımız çalışmalar ve analizler sonucunda döngüsel yüklere mağruz kalan peketli kirişlerin delik çapları arttıkça;

1. Moment dayanımı azalmıştır ama altın orana göre tasarlanan delik çapı  $D=148\text{mm}$  olan kirişin moment dayanımı delik çapı kendinden küçük olan ( $D=137$ ) petek kirişe daha yüksektir.
2. Rijitlik ve dönme kapasitesi azalmıştır ama altın orana göre tasarlanan petek kirişin rijitlik ve dönme kapasitesi artış göstermiştir.
3. Enerji yutma kapasiteleri azalmıştır ama altın orana göre tasarlanan petek kirişin enerji yutma kapasitesi perfect modele çok yakın olduğunu göstermiştir.

Önerimiz daha önceden belirlenen geometrik sınır şartların;

$1,25 < H_s/D_0 \leq 1,618$  düzeltilirse ölü ağırlığı daha düşük ve güvenli petek kirişler tasarlanmış oluruz.

## KAYNAKLAR

- Akdeniz, F. 2007. Doğada, Sanatta, Mimaride: Altın Oran ve Fibonacci Sayıları. Nobel Kitabevi, 120, İstanbul.
- Ayhan V. 2007, Atık lastik ilaveli kumun kesme kuvveti parametrelerinin bulunması ve değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 113, İstanbul.
- Anonim, 2015. Web Sitesi: <https://analizsimulasyon.com/mesh-olusturma-kriterleri/>, Erişim Tarihi: 03.05.2023.
- Anonim, 2017. Web Sitesi: <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/11/strain-gaugen-dir-nasil-calisir/>, Erişim tarihi: 03.05.2023.
- Anonim, 2022. Web Sitesi: <https://usakcelik.com.tr/petek-makas/>, Erişim Tarihi: 03.05.2023.
- Bergil, M., 1993, Doğada, Bilimde, Sanatta, Altın Oran. Arkeoloji ve Sanat Yayınları, 155, İstanbul.
- Beyoğlu, A. 2016. Sanat eğitiminde altın oran ve Leonardo da Vinci'nin eserleri arasındaki ilişkinin incelenmesi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 13(1), 360-382.
- Bi, R., Jia, L., Li, P., ve Wang, Q. 2021. Multiparameter seismic behavior of castellated beam-to-column connections based on stress migration. In Structures, 29, 1137-1153.
- Cashell, K. A., Malaska, M., Khan, M., Alanen, M. ve Mela, K. 2021. Experimental and numerical analysis of stainless steel cellular beams in fire. Fire Safety Journal, 121, 103-277.
- Chung, K. F., Liu, T. C. H., ve Ko, A. C. H. 2001. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. Journal of Constructional Steel Research, 57(5), 467-490.
- Çelik, E. 2017. Evrimsel ve topoloji optimizasyon yöntemi ile eğilmeye çalışılan boşluklu kirişlerin boyut analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 93, Elazığ.
- De Carvalho, A. S., Rossi, A. ve Martins, C. H. 2022. Assessment of lateral-torsional buckling in steel I-beams with sinusoidal web openings. Thin-Walled Structures, 175, 109-242.
- Dunlap, A. 2003, The Golden Ratio and Fibonacci Numbers World Scientific Press. World Scientific, 170, London.
- Ellobody, E. 2012. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes. Thin-Walled Structures, 52, 66-79.

- Erdal, F., Saka, M. P. 2013. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 355-368.
- Ferreira, F. P. V., Martins, C. H., De Nardin, S. 2020. Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 172, 106-182.
- Ferreira, F. P. V., Shamass, R., Santos, L. F. P., Limbachiya, V. ve Tsavdaridis, K. D. 2022. EC3 design of web-post buckling resistance for perforated steel beams with elliptically-based web openings. *Thin-Walled Structures*, 175, 109-196.
- Ghyka, M., 1977, *The Geometry of Art and Life* Dover Publications. Paperback, 174, New York.
- Grilo, L. F., Fakury, R. H., de Souza Verissimo, G. 2018. Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 525-541.
- Guo, J., Shi, Q., Li, T. ve Ma, G. 2023. Mechanical performance of hybrid high-strength steel composite cellular beam under low cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 203, 107-801.
- Hosain, M. U., Spiers, W. G. 1973. Experiments on castellated steel beams. *Department of Civil Engineering*, 14, 1-14.
- Kalaycıgil M. 2007. Petek kirişlerin davranışları ve tasarım esasları. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 202, Kayseri.
- Kang, L., Hong, S., ve Liu, X. 2021. Shear behaviour and strength design of cellular beams with circular or elongated openings. *Thin-Walled Structures*, 160, 107-353.
- Kaygısız İ. 2019. Dairesel boşluklu çelik kirişlerin kurt kolonisi algoritması kullanılarak optimum boyutlandırılması. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 63, Manisa.
- Kerdal, D., ve Nethercot, D. A. 1984. Failure modes for castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 4(4), 295-315.
- Lawson, R. M. 1987. Design for openings in the webs of composite beams. CIRIA, 44, Büyük Britanya.
- Liu, T. C. H. ve Chung, K. F. 2003. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: finite element investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, 59(9), 1159-1176.
- Luo, C., Wang, F., Chen, H., Chen, L., Fu, C., Chen, Y. ve Liao, Q. 2022. Castellated steel beams under impact load. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107-394.

- Morkhade, S. G., Jagtap, K. R., Ghorpade, P. S., Ahiwale, D. D. ve Najm, H. M. 2022. Buckling performance evaluation of steel cellular beams strengthened with flange cover plate. *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(8), 1277-1290.
- Sayed, A. M. 2022. Numerical study of the effects of web openings on the load capacity of steel beams with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107- 418.
- Seailles, G. 2012. Leonardo da Vinci. Yapı Kredi Yayınları, 256, İstanbul.
- Sehwail, M. M. ve Celikag, M. 2022. Load carrying capacity of hot-rolled hybrid cellular steel beams: Experimental Investigations. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(10), 12633-12648.
- Selçuk, S. A., Sorguç, A. G., Akan, A. E. 2009. Altın oranla tasarlamak: doğada, mimarlıkta ve yapısal tasarımda dizini. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 149-157.
- Sonck, D., Van Impe, R., ve Belis, J. 2014. Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and castellated members. *Construction and Building Materials*, 54, 512-519.
- Sweedan, A. M. 2011. Elastic lateral stability of I-shaped cellular steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(2), 151-163.
- Tavlaşoğlu, M.E. 2022. Hafif çelik yapılarda vidalı kolon kiriş birleşiminin döngüsel yükler altındaki davranışının deneysel olarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 107, Erzurum.
- Tekkanat, N. 2006. Altın oran'ın kaynakları ve sanat'a yansımaları. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Grafik Ana Bilim Dalı, 105, Antalya.
- Tsavdaridis, K. D. ve D'Mello, C. 2011. Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1605-1620.
- Wang, P., Guo, K., Liu, M., ve Zhang, L. 2016. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 173-184.
- Ward, J. K. 1990. Design of composite and non-composite cellular beams. The Steel Construction Institute, 156, İngiltere.